

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор Белорусского
государственного университета



Д.М. Курлович

«18» ноября 2022 г.

ОТЗЫВ

опонирующей организации по диссертационной работе
Замковца Анатолия Дмитриевича

«Резонансные взаимодействия оптического излучения с плазмонными наноструктурами и слоистыми средами» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика (выписка из протокола от «10» ноября 2022 г. № 4 заседания объединенного научного семинара кафедры лазерной физики и спектроскопии и кафедры физической оптики и прикладной информатики)

1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли наук.

Диссертация А.Д. Замковца посвящена обнаружению закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с плотноупакованными ансамблями металлических наночастиц в зависимости от их геометрических и материальных свойств, а также параметров контактирующих диэлектрических и полупроводниковых материалов, установлению особенностей спектральных характеристик многослойных плазмонных наноструктур с фотонными запрещенными зонами, обладающими спектральной-селективностью в терагерцовом, инфракрасном и видимом частотных диапазонах. Содержание работы полностью соответствует специальности 01.04.05 – Оптика и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

2. Научный вклад соискателя в разработку научной проблемы с оценкой его значимости.

Одной из важных проблем на стыке оптики и материаловедения является поиск материалов, которые могут использоваться для субволновой локализации электромагнитного излучения. Такая локализация может быть достигнута посредством возбуждения плазмонного резонанса на границе раздела проводящих и диэлектрических сред и проявляется в виде поверхностной электромагнитной волны или локализованного плазмонного резонанса. Возбуждение плазмонов играет важную роль для таких приложений, как увеличение разрешающей способности линз (суперлинз, гиперлинз) на основе структурированных материалов, передача энергии вдоль границы раздела сред (поверхности чипа), детектирование отдельных молекул в спектрах комбинационного рассеяния путем многократного усиления электрического поля вблизи плазмонной наночастицы. При этом важной научной проблемой является поиск материалов и наноструктур, которые позволили бы наиболее

эффективно локализовать электромагнитное излучение на масштабах много меньше длины волны. В последнее десятилетие в мировых научных центрах для этих целей рассматривались материалы за пределами металлов, такие как графен и прозрачные проводящие оксиды (например, ITO и AZO), однако их плазмонные свойства значительно хуже свойств благородных металлов. В диссертации А.Д. Замковца изучены плазмонные наноструктуры в виде планарных слоев металлических (золотых, серебряных, медных) наночастиц. Соискатель устанавливает закономерности, обусловленные плотной упаковкой наночастиц ансамбля и, таким образом, вносит значимый вклад в развитие актуального научного направления плазмоники наноструктур.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая ученая степень.

А.Д. Замковцу может быть присуждена ученая степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05—Оптика за новые научно обоснованные результаты в области плазмоники, наиболее важными из которых являются следующие:

1. экспериментально и теоретически показано, что длинноволновой сдвиг максимума полосы поверхностного плазмонного резонанса поглощения обусловлен когерентными эффектами взаимодействия наночастиц при их плотной упаковке;

2. сильное влияние материала матрицы, в которой находится монослой наночастиц, объяснено изменением величины кулоновского динамического экранирования коллективных колебаний электронной плотности в металлических частицах. При этом обнаружено, что собственное поглощение в фуллереновой матрице ответственно за ослабление взаимодействия между наночастицами;

3. экспериментально установлено, что существует когерентное электродинамическое взаимодействие между монослоями плотноупакованных металлических наночастиц, разделенных четвертьволновыми диэлектрическими пленками;

4. найдено, что оптическая плотность наноструктур Ag-CuPc, Ag-NiPc в длинноволновом относительно полосы поверхностного плазмонного резонанса диапазоне достигает наибольших значений при сопоставимых размерах толщины металлофталоцианиновой пленки и диаметра металлической наночастицы;

5. обнаружено, что благодаря сильному взаимодействию наночастиц меди и серебра происходит усиление плазмонного резонанса меди и оптической плотности двухслойной системы наночастиц меди и серебра, полученных методом термического испарения металлов. Полученные результаты могут быть использованы на практике для определения влияния границ раздела между компонентами устройств;

6. установлена плазмон-зависимая модификация спектрально-кинетических свойств тонкой пленки фталоцианина меди в присутствии плазмонных наночастиц, что можно наблюдать как наведенное просветление в спектральной области полос электронного поглощения органической компоненты при облучении гибридной системы Ag-CuPc фемтосекундным лазерным

импульсом на частоте плазмонного резонанса. Данные исследования могут служить фундаментом для создания устройств оптической модуляции и переключения;

7. используя явления поверхностного плазмонного поглощения и межслойной интерференции, разработаны и изготовлены антиотражающие покрытия на основе плотноупакованных слоев наночастиц серебра и диэлектрических слоев Na_3AlF_6 ;

8. для терагерцового излучения предложена конструкция отрезающего фильтра в виде несимметричной полимер-кристаллической (например, полиэтилен-германиевой) интерференционной системы с квазиоднородными слоями Ge-Li высокого показателя преломления. Разработаны способы изготовления полимер-кристаллических структур для применения в дальнем инфракрасном диапазоне.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в использовании многослойных структур на основе слоев плотноупакованных металлических наночастиц для создания спектрально-селективных и модулирующих устройств. Локализация излучения в антиотражающих системах перспективна для увеличения эффективности солнечных элементов. В то же время усиление электромагнитного излучения за счет когерентного взаимодействия плотноупакованного ансамбля наночастиц может найти применение в технике поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии. Отрезающие фильтры для ближнего инфракрасного диапазона уже были использованы в научных исследованиях, что подтверждается соответствующими актами.

4. Замечания по работе.

При положительной оценке диссертационной работы необходимо сделать следующие замечания.

1. На с. 18 диссертации указано, что частота поверхностного плазмон-поляритона задается формулой (1.2). Однако это не всегда верно. Поверхностные плазмон-поляритоны – это распространяющиеся поверхностные электромагнитные волны, чья частота зависит от волнового числа (дисперсия волн). Частота (1.2) – это частота плазмона, статический предел дисперсионной зависимости поверхностных плазмон-поляритонов при стремящемся к бесконечности волновом числе поверхностной волны.

2. В главах 4 и 5 диссертации размеры металлических компонент несколько нанометров и даже менее нанометра. При этом модель диэлектрической проницаемости металла подразумевается согласующейся с моделью Крейбига, которая учитывает столкновение свободных электронов с поверхностью металла. Однако этого недостаточно. При теоретических расчетах соискателю следует учитывать также квантовую природу коллективного поведения электронов проводимости на масштабах менее 5 нм. Можно воспользоваться гидродинамической моделью Друде. Она учитывает электрон-электронное отталкивание для электронов, возникающее благодаря принципу Паули.

3. Обозначения величины k в формулах (3.1) и (3.2) диссертации не согласованы. В формуле (3.1) k – безразмерный коэффициент поглощения материала матрицы, а в формуле (3.2) k – волновое число.

4. В диссертации при иллюстрации результатов измерений нет сведений о динамическом диапазоне измерительных устройств и погрешности измерений. В ряде же случаев приводятся и обсуждаются зависимости, основанные на регистрации изменений оптической плотности в третьем знаке после запятой (рис. 6.8, 6.9 на стр. 169-171 диссертации и рис. 8, 9 в автореферате).

5. В главе 7 приводятся данные по разработке фильтров, которые могут быть использованы в качестве отрезающих для ближнего ИК диапазона (рис. 7.5 на стр. 184 диссертации и рис. 10 в автореферате). При этом нет сравнения с традиционными фильтрами и не обсуждаются пути их совершенствования. Какие преимущества подобных изделий?

6. В главе 4 анализируются зависимости спектральных характеристик при использовании многослойных структур, разделенных четвертьволновыми по оптической толщине диэлектрическими промежутками, но ничего не говорится о точности создания таких слоев.

7. Есть небольшое количество неточностей, связанных с оформлением графического материала. Например, на рис. 1.2 диссертации присутствуют англоязычные надписи.

Указанные выше замечания носят частный характер и не затрагивают сформулированные в диссертации выводы.

5. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Личный вклад соискателя в работу заключается в постановке задач исследования и получении всех основных научных результатов, включающих изготовление и исследование образцов, обсуждение теоретических расчетов и их интерпретацию. Основные выводы и положения диссертации подтверждены согласием экспериментальных и теоретических результатов, полученных соискателем и известным в литературе, а потому представляются достоверными и обоснованными. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК РБ. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на более 50 республиканских и международных научных конференциях и представлены в 35 статьях в научных журналах в соответствии с п.19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь.

Диссертационная работа Замковца Анатолия Дмитриевича является завершенным самостоятельным квалификационным исследованием, соответствующим требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (пп. 20–26 “Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь”), содержит принципиально новые результаты, совокупность которых является крупным достижением в развитии экспериментальных методов создания и измерения оптического отклика многослойных наноструктур, включающих плотноупакованные слои плазмонных наночастиц, и может быть рекомендована к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05–Оптика. Научная новизна и значимость полученных

результатов свидетельствуют о том, что ее автор Замковец Анатолий Дмитриевич **заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук за

- обоснование механизмов коллективного электродинамического взаимодействия в системе плотноупакованных плазмонных наночастиц посредством регистрации сдвига максимума полосы поглощения поверхностного плазмонного резонанса;
- экспериментальное обнаружение увеличения оптической плотности тонких пленок органических полупроводников, металлофталоцианинов и четвертьволновых диэлектрических пленок благодаря усилению локального электромагнитного поля и деструктивной межслойной интерференции при их взаимодействии с плотноупакованными ансамблями металлических наночастиц;
- обоснование быстрой компоненты кинетики релаксации просветления гибридной наноструктуры серебро-фталоцианин меди изменением состояния электронной подсистемы плазмонных наночастиц в результате их возбуждения фемтосекундными импульсами;
- разработку методов создания антиотражающих покрытий и отрезающих фильтров с использованием эффектов поверхностного плазмонного поглощения и межслойной интерференции в терагерцовом, инфракрасном и видимом диапазонах,

что в совокупности позволяет усовершенствовать методы производства плазмонных наноструктур и устройств на их основе, а также расширить возможности управления электромагнитными полями в широком спектральном диапазоне.

На заседании объединенного научного семинара кафедры лазерной физики и спектроскопии и кафедры физической оптики и прикладной информатики (10 ноября 2022 года, протокол № 4) присутствовали д.ф.-м.н. проф. Толстик А.Л., заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии (председатель научного семинара); д.ф.-м.н. доц. Новицкий А.В., заведующий кафедрой физической оптики и прикладной информатики (эксперт); д.ф.-м.н. проф. Воропай Е.С., профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии; д.ф.-м.н. проф. Могильный В.В., профессор кафедры физической оптики и прикладной информатики; к.ф.-м.н. доц. Буров Л.И., доцент кафедры общей физики; к.ф.-м.н. доц. Мельникова Е.А., доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии; к.ф.-м.н. доц. Ермалицкая К.Ф., доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии; к.ф.-м.н. доц. Горбач Д.В., доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии (всего: 4 доктора наук, 4 кандидата наук).

СЛУШАЛИ:

1. Доклад Замковца Анатолия Дмитриевича, который изложил краткое содержание, основные положения и выводы представленной диссертации.
2. Проект отзыва оппонировавшей организации, представленный д.ф.-м.н. Новицким А.В. – экспертом оппонировавшей организации, назначенным прика-

зом № 669-ОД от 08 ноября 2022 г.

В обсуждении диссертации приняли участие: профессор А.Л. Толстик, профессор Е.С. Воропай, доцент Л.И. Буров, доцент А.В. Новицкий.

В голосовании приняли участие 8 членов семинара, имеющие ученые степени. Результаты открытого голосования: «За» – 8, «Против» – нет, «Воздержались» – нет.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. Рекомендовать к защите диссертацию Замковца Анатолия Дмитриевича «Резонансные взаимодействия оптического излучения с плазмонными наноструктурами и слоистыми средами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.
2. Одобрить заключение оппонировавшей организации.

Председатель научного семинара -
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ



А.Л.Толстик

Эксперт -
доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий кафедрой физической оптики и прикладной информатики физического факультета БГУ



А.В.Новицкий

Ученый секретарь на заседании -
кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ



Е.А.Мельникова