

ОТЗЫВ

официального оппонента Моисеева Сергея Андреевича
о диссертационной работе Рожко Михаила Викторовича
«Широкополосное нелинейно-оптическое преобразование мощных
сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Генерация световых импульсов очень короткой длительности, максимальной возможной интенсивности и использование таких лазерных импульсов в изучении и управлении быстрыми процессами является одной из фундаментальных проблем лазерной физики. Это направление исследований привлекает большое внимание физиков–лазерщиков с момента появления первых лазеров, продолжая оставаться одним из самых актуальных направлений лазерной физики. В настоящее время эти работы привели к появлению и широкому использованию фемтосекундных лазеров, что сильно обогатило возможности решения большого круга задач физики, химии, биологии, медицины, техники и т.д. Остановливаясь лишь на решении физических задач, стоит отметить применение фемтосекундных лазеров в изучении быстрой динамики атомов и молекул, разработке методов фемтохимии, микроскопии и микроспектроскопии, способов сверхплотной записи информации, источников квантовых состояний света и их использование в решении задач квантовой информатики. Большое применение нашли фемтосекундные лазеры в качестве источника частотных гребенок, позволяющих связать между собой радиочастотный и оптический диапазоны, и для разработки эталонов частоты. Мощные фемтосекундные лазеры стали основой разработки методов генерации аттосекундных световых импульсов, использование которых открывает в настоящее время новые горизонты в изучении наиболее быстрой динамики и в создании сверхинтенсивных световых полей. Настоящая диссертация посвящена решению этого актуального круга задач.

Автор, обосновывая перспективность использования мощных (субтераваттных) фемтосекундных импульсов лазерного излучения среднего ИК диапазона в решении этих задач, ставит **своей целью** развитие новых нелинейных методов генерации широкополосного излучения со спектром, простирающимся от единиц ГГц до вакуумного УФ, а также применение генерируемого сверхширокополосного излучения для изучения быстрой динамики газообразных и твердотельных веществ, реализации сверхбыстрой нелинейной спектроскопии, дистанционного зондирования. Автор демонстрирует, что разрабатываемые при этом методы генерации излучения открывают уникальные возможности в решении большого числа новых задач лазерной физики, к которым ранее невозможно было подступиться. Надо также признать, что развитие новых методик генерации сверхширокополосного излучения имеет непосредственное большое значение для создания новых методов генерации аттосекундных импульсов, развития соответствующей техники эксперимента и получения с ее помощью новых экспериментальных данных о сверхбыстрой динамике атомов, субрелятивистской динамике плазмы, что позволяет получать принципиально новое знание о динамике вещества, а также способствует появлению новых полезных практических приложений, так что тема диссертации является очень актуальной.

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение. Содержание работы представлено на 125 страницах, включая 39 рисунков и список из 178 наименований цитируемой литературы.

В **главе 1** автор проводит детальный обзор и анализ физических механизмов генерации суперконтинуума и гармоник высшего порядка при воздействии мощного лазерного излучения на газообразное и твердотельное вещество, отмечая особенности нерелятивистского и релятивистского режима взаимодействия. Начиная с анализа трехступенчатой модели Коркума, автор отмечает, что при использовании лазеров среднего ИК диапазона наибольшую роль начинает играть динамика свободных

электронов в отличие от лазеров ближнего ИК диапазона. При этом автор показывает наличие весьма богатой картины нелинейных оптических взаимодействий, сопровождающих генерацию широкополосных световых полей в процессе взаимодействия мощных сверхкоротких световых импульсов с газообразными и твердыми телами. На примере одного из изучаемых в диссертации методов такой генерации широкополосного излучения, основанного на эффекте лазерной филаментации, показывается, что в процесс генерации вторичного излучения вовлекается целый ряд оптических эффектов: дифракция света, дисперсия, оптические нелинейности, эффекты фотоионизации вещества, а также самофокусировка и самоукручение лазерных импульсов. Экспериментальное изучение и теоретическое описание возникающего круга эффектов потребовало проведение большого комплекса работ и высокую квалификацию физика-экспериментатора, владеющего теоретическими методами исследования нелинейной лазерной динамики и спектроскопии.

Имея одной из своих важнейших целей более высокий энерговклад в генерацию высоких гармоник, автор показывает, что такая генерация становится возможной при переходе к твердотельным мишеням, поскольку в газовых струях на генерацию гармоник начинает отрицательно сказываться ионизация атомов при использовании интенсивностей выше $I \gtrsim 10^{15}$ Вт/см². В экспериментах с достаточно толстыми мишенями (много больших длины волны взаимодействующего света) основными являются такие механизмы генерации гармоник, как когерентное кильватерное излучение осцилляциями электронной плазмы и излучение релятивистского осциллирующего зеркала. Отмечается, что высокочастотная граница спектра генерируемых во втором механизме высоких гармоник не зависит от материала мишени, а, прежде всего, определяется интенсивностью лазерного излучения и позволяет получать аттосекундные спектрально-ограниченные импульсы с пренебрежимо малым чирпом. Далее автор обращает внимание на то, что в газообразных и твердотельных мишенях кинетическая энергия свободного

электрона, возбуждаемого лазерным импульсом накачки, пропорциональна квадрату длины волны поля накачки, $K_e \sim I_0 \lambda_0^2$, где I_0 – интенсивность лазерного излучения, а также на то, что амплитуда смещения свободных электронов при нерелятивистских интенсивностях $d_e \sim \lambda_0^2$ и асимптотически стремится к зависимости $d_e \sim \lambda_0$ при субрелятивистских и релятивистских режимах. Откуда делается вывод, что эти закономерности показывают на перспективность использования лазерных импульсов большей длины волны для эффективного возбуждения плазменных колебаний и генерации гармоник высокого порядка.

Также автор отмечает, что создаваемая установка может стать компактной альтернативой крупномасштабным синхротронным системам и мощным инструментом для исследований сверхбыстрой аттосекундной электронной динамики на лабораторном уровне. Таким образом, в результате анализа различных режимов генерации широкополосного излучения мощными длинноволновыми лазерными импульсами ИК диапазона автор обоснованно делает вывод, что основные механизмы генерации обусловлены динамикой плазменных токов свободных электронов и соответствующими ей широкополосными оптическими нелинейностями. Итак, на основе сделанного наблюдения, что динамика плазменных токов свободных электронов лежит в основе всех механизмов широкополосного нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов, и обнаруженной зависимости поведения их свойств от центральной длины волны импульса накачки, автор делает вывод, что использование сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона (более длинноволнового диапазона) представляет собой важное перспективное направление исследования и является темой настоящей диссертационной работы.

Трудно не согласиться с важностью такого вывода в выборе предлагаемых параметров импульса накачки, хотя этот вывод автора следует признать скорее надежной гипотезой, чем строгим теоретическим выводом, справедливым без какого-либо исключения при использовании всех

возможных механизмов широкополосного нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов, которые могут быть реализованы во всех возможных веществах. Тем не менее, сделанный вывод далее подкрепляется в проведенном исследовании и имеет надежную основу для применения в дальнейших работах.

Глава 2 посвящена описанию схемы и принципам работы лазерного источника мощных сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона, в котором с частотой повторения 20 Гц генерируются импульсы на несущей (центральной) длине волны $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, с длительностью $\tau_0 \approx 80$ фс и энергией до $E \approx 30$ мДж. Установка также допускает плавную регулировку ширины и формы спектра, длительности и начального фазового профиля лазерных импульсов. Этот лазер использовался во всех экспериментальных работах диссертации.

В данной главе эксперименты проводились с газообразным азотом в широком диапазоне давлений. Наблюдалась генерация 2.7-октавного суперконтинуума. Было обнаружено, что в области низких давлений азота 0.007-2.4 мбар наблюдался рост сигнала высоких гармоник 17-31 порядка. Максимум достигался при $p_{N_2} = 2.4$ мбар с максимальным контрастом, затем интенсивность генерации падала и практически исчезала при $p_{N_2} > 0.1$ бар. Такое поведение являлось следствием конкурентного действия поглощения и нелинейности, растущих с повышением давления газа. Получен большой объем экспериментальных данных, описывающих генерацию большого числа гармоник в диапазоне длин волн от 125 нм до 850 нм.

Детальный анализ полученных экспериментальных данных позволил автору обнаружить, что генерируемые световые гармоники, действуя на молекулы, приводят к проявлению эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в спектрах излучения. Этот эффект проявился для различных гармоник, что вызывает однопучковый и одноимпульсный спектроскопический сигнал молекулярного отклика, который хорошо обнаруживает себя в зарегистрированных спектрах излучения плазмы. Этот

эффект автор использовал в спектроскопии колебательного перехода $N_2(0,0)$ $v' = 0 \rightarrow v'' = 0$ второй положительной системы азота $B^3\Pi_g \rightarrow C^3\Pi_u$ $\lambda_p \approx 337.1$ нм (комментарий: в тексте диссертации не введено понятие «второй положительной системы азота») На основе проведения теоретического анализа колебательных состояний молекул азота в условиях теплового равновесия автором вычислены сечения вращательных комбинационных переходов между колебательно-вращательными состояниями молекул азота, которые очень хорошо описали экспериментально обнаруженные пики стоксовой и антистоксовой ветвей колебательно-вращательной полосы азота $B^3\Pi_g \rightarrow C^3\Pi_u$. Эти возможности автор также продемонстрировал, обнаружив ВКР вблизи пика 15-й гармоники, на переходах $v' = 0 \rightarrow v'' = 2$ и $v' = 0 \rightarrow v'' = 3$ в γ -системе монооксида азота $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ (247.9 нм, 259.6 нм, соответственно) даже при достаточно низком (<0.1%) содержании кислорода в газовой камере.

Стоит отметить, что в наблюдении спектров ВКР большую роль играют нелинейные эффекты генерации гармоник, проявление когерентности взаимодействия, условия фазового синхронизма, влияние давления в газе и т.д. Эти вопросы исследованы и учтены в диссертации, что говорит о высокой квалификации автора, глубоком понимании им физической картины процессов, происходящих в реализованных экспериментах. Примечательным и весьма неожиданным оказалось то, что наблюдаемые линии ВКР обладают очень узкой спектральной шириной, много меньшей спектральной ширины гармоники, которая выполняет роль накачки, и проявились в виде узкого пика стоксового усиления и узкого провала антистоксового поглощения.

Также важно отметить, что автором продемонстрирована возможность использования некогерентного излучения плазмы для наблюдения дополнительных спектроскопических переходов изучаемого вещества. В данном случае это продемонстрировано на колебательных переходах второй положительной системы $B^3\Pi_g \rightarrow C^3\Pi_u$ молекулярного азота, а также при наличии примесей в гелии и неоне.

Проведенное спектроскопическое исследование продемонстрировало успешность использования генерируемых гармоник в решении спектроскопических задач. Поскольку фемтосекундные импульсы среднего ИК диапазона могут генерировать гармоники высокого порядка в широком диапазоне частот, то использование этих гармоник открывает возможности в проведении спектроскопии веществ в широком рабочем спектральном диапазоне.

Отмечу, что автору во второй главе удалось развить новые методики использования комбинационной спектроскопии в исследованиях сверхбыстрых процессов и получать при этом важную информацию о фотоионизации молекул, о динамике ориентирования и фазирования молекул в поле мощных сверхкоротких импульсов. Проведенное автором разностороннее экспериментальное и теоретическое исследование производит очень сильное впечатление, убедительно демонстрирует высокий уровень владения им нелинейной физикой взаимодействия световых импульсов с веществом, проявляющейся в генерации широкополосных полей возбуждаемой плазмой и гармоник высокого порядка, а также открывает удивительные новые возможности использования методов спектроскопии комбинационного рассеяния в столь необычных условиях взаимодействия света с веществом.

Далее автор отмечает, что высокая степень ионизации газового вещества, возникающая для интенсивности лазерной накачки выше 10^{15} Вт/см², приводит к насыщению нелинейного дипольного отклика и значительному ухудшению условий фазового согласования, что негативно сказывается на эффективности генерации ГВП и делает актуальным использование твердотельных мишеней.

В главе 3 приводятся экспериментальные результаты генерации гармоник высокого порядка (ГВП) при воздействии используемого лазерного излучения на поверхность твердотельной мишени. Были реализованы две экспериментальные схемы генерации ГВП от поверхности твердотельной

мишени, которые размещались в вакуумных камерах. Лазерные импульсы накачки фокусировались на поверхность твердотельной мишени, что позволяло повысить интенсивность излучения на поверхности мишени.

Постановка экспериментов с большей интенсивностью накачки, позволяющих генерацию и регистрацию высоких гармоник в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне, потребовала существенной модификации установки. В связи с чем, в этой главе автор уделил большое внимание описанию двух вводимых модификаций установки, представленных на рис. 13, 16, и методам регистрации сигналов (см. рис. 18, 21). При этом потребовалось использовать дифракционную решетку с более высокой эффективностью, работающую под гораздо большим углом падения и в более коротковолновой области спектра (менее 100 нм). Также из-за существенного уменьшения эффективности генерации ГВП с увеличением их частоты был использован детектор с более высокой чувствительностью. Был сделан и целый ряд других усовершенствований, в результате проделанной модификации установки была достигнута интенсивность накачки на поверхности мишени (полистирола, фторида кальция и алюминия) до величины $I \approx 1.3 \cdot 10^{17}$ Вт/см² и обеспечено усиление эффективности детектирования гармоник на несколько порядков. Достигнутая интенсивность лазера накачки позволила ускорять электроны до энергий, сравнимых с энергией покоя. Это позволило автору получить важные новые экспериментальные результаты.

Автор продемонстрировал генерацию гармоник в широком спектральном диапазоне 75-2000 нм. Таким образом, удалось генерировать мультиоктавный спектр гармоник до 51 порядка (для мишени из полистирола), которые демонстрировали высокую направленность, свидетельствующую о когерентности этого излучения. Экспериментально обнаруженные поляризационные свойства генерируемого излучения продемонстрировали механизм когерентного кильватерного излучения плазмы, возбуждаемой на поверхности толстой твердотельной

полистироловой мишени фемтосекундными лазерными импульсами при субрелятивистском уровне интенсивности. ГВП излучались в виде цугов аттосекундных импульсов с переменным временным интервалом между отдельными импульсами внутри цуга. В главе 3 отмечено, что теоретически данный механизм описан в 2010 году другими авторами. Автором также экспериментально изучен характер спада интенсивности генерируемых гармоник, который хорошо согласуется с недавно полученными теоретическими результатами.

Стоит отметить интересную предложенную в диссертации возможность увеличения контраста в генерации ГВП за счет введения дополнительного оптимального chirpирования лазерного импульса накачки и обнаружение, что флуктуации интенсивности и моды лазерных импульсов снижают интенсивность генерации высших гармоник, что говорит о когерентном характере процесса их генерации. Наконец, также стоит отметить, что в процессе генерации ГВП на твердотельной мишени автор наблюдал линии трехкратно ионизированного углерода C IV и линию четырехкратно ионизированного углерода C V. При этом энергии лазерных импульсов оказалось достаточно для преодоления энергии ионизации 65 эВ, что демонстрирует высокую интенсивность созданного лазерного импульса накачки и перспективы его использования в высокоэффективной реализации многоквантовых переходов.

Таким образом, в данной главе создана оригинальная установка и проведены эксперименты по генерации ГВП от поверхности твердотельной мишени в поле лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона при субрелятивистском уровне интенсивности лазерной накачки порядка 10^{17} Вт/см². При этом зарегистрирован 51 порядок генерируемых гармоник. Также изучен ряд неизвестных ранее когерентных свойств подобной генерации ГВП. Достигнутые результаты открывают пути в разработке эффективных управляемых режимов генерации аттосекундных импульсов излучения и новые возможности в изучении аттосекундной динамики.

Глава 4 посвящена исследованию генерации мультидекадного низкочастотного излучения в газах при воздействии мощных сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона. Вначале дается описание схемы генерации. Возбуждаемые газы (криптон, аргон, гелий, молекулярные чистые и смешанные газы: азот и воздух) помещались в ячейку из органического стекла, давление газа варьировалось в широких пределах. В качестве зондирующего лазерного излучения использовалось одно- и двухцветное излучение с применением лазера на длине волны $\lambda \approx 3.9$ мкм, с длительностью $\tau \approx 80$ фс и энергией W_L от 6 до 15 мДж.

В результате воздействия лазерного импульса накачки на газовую среду генерировалось излучение суперконтинуума, спектр которого начинался от СВЧ диапазона и доходил до УФ диапазона. Наблюдалась сложная диаграмма направленности. Для характеристики параметров генерируемого излучения в изучении временных, пространственных, поляризационных зависимостей СВЧ-ТГц сигнала применялся сложный комплекс аппаратуры. Изображенная на рис. 23 схема экспериментальной установки показывает многообразие использованных технических методик, включая средства для измерения параметров генерируемого терагерцового и СВЧ-излучения. Автор в деталях описывает методы регистрации этого излучения, где большое внимание уделяет электрооптическому семплированию и автокорреляционной схеме регистрации ТГц сигнала. Разработанная методика измерения позволила осуществить высокочувствительную регистрацию излучения в диапазоне частот от 70 ГГц до 17 ТГц. Для детектирования параметров генерируемого СВЧ-излучения была разработана своя методика измерений на основе коаксиально-волноводных переходов и рупорных антенн, что позволило детектировать СВЧ-излучение в диапазоне от 0.1 ГГц до 50 ГГц.

Автор детально описывает проводимые эксперименты, получаемые результаты, которые приводятся на графиках, частотных спектрах, временных зависимостях, фотографиях поперечного сечения пучков

низкочастотного излучения. В экспериментах была продемонстрирована широкополосная генерация СВЧ-сигналов, например, в воздухе при давлении нескольких десятков мбар. Автор смог получить детальную информацию о параметрах и свойствах генерации СВЧ-ТГц сигнала. Было обнаружено, что газы с более низким потенциалом ионизации обеспечивают больший по амплитуде сигнал. На примере газовой среды криптона показано, что существует оптимальное давление, при котором достигается максимум СВЧ-импульса, когда пиковая мощность лазерного импульса совпадает с мощностью самофокусировки. Интересно, что характерная длительность СВЧ-ТГц импульса оказалась меньше длительности импульса накачки, то есть ≈ 70 фс, что говорит о нелинейной природе генерации (было бы желательно иметь комментарий о взаимосвязи длительности импульса накачки и длительности СВЧ-ТГц импульсов). Автор приводит оценку напряженности поля СВЧ-импульса ≈ 50 кВ/см. Также были изучены поляризационные свойства СВЧ-импульса, которые оказались ярко выраженными и разными для одночастотного и двухчастотного импульса лазерной накачки. Была установлена линейность поляризации ТГц части низкочастотного излучения в условиях генерации двухцветным полем лазерных импульсов среднего ИК диапазона.

Авторы связывают механизм появления вторичного низкочастотного излучения с возникновением плазменных колебаний, возбуждаемых поперечными и поперечно-продольными продольными кильватерными полями. Пространственно-временные и поляризационные свойства детектируемого излучения описываются моделями черенковского излучения и импульсной антенны. Эти вопросы детально изучаются автором и в рамках теоретического подхода, ранее используемого его коллегами и другими авторами при исследовании черенковского излучения. В общем и целом, используемая теоретическая модель хорошо описала экспериментальные результаты.

По ходу изложения на стр. 94, автор вводит выражение для векторного потенциала $A_z(\omega) = (e/2c)a(\rho, \omega)\exp(-i\omega z/v)$, где желательно было бы определить функцию $a(\rho, \omega)$. Поскольку далее это выражение используется для нахождения решения для излучаемого поля в дальней зоне, в котором уже не видно, как полученное решение связано с функцией $a(\rho, \omega)$.

При использовании конечной длины газовой среды L , представляется важным рассмотреть немгновенное возникновение и исчезновение плазменного тока на границах среды. Поскольку максимальное ускорение электронов ограничено плазменной частотой, желательно было бы это учесть в используемом выражении для тока-источника излучения вблизи границ среды. Поскольку в рассматриваемой же теоретической модели ток возбуждается мгновенно на передней границе среды и мгновенно исчезает на задней границе, то такое поведение токов порождает их бесконечное ускорение, что, очевидно, может приводить к слишком завышенной оценке возникающего излучения в используемой теоретической модели.

Очень интересны оказались экспериментальные результаты, полученные при изучении сравнительных особенностей генерации СВЧ-ТГц импульсов одно- и двухцветными лазерными импульсами. Это исследование позволило выявить и изучить поляризационные особенности излучения и, соответственно, свойства их источника. При изучении диаграммы направленности в излучении импульсов СВЧ суперконтинуума, автор обнаружил, что при действии одночастотной лазерной накачки генерируемое низкочастотное излучение характеризуется очень широкой боковой направленностью. В случае двухцветного лазерного возбуждения видна более сильная направленность вперед (при $\theta < 50^\circ$) для высокочастотной области спектра. При этом на центральной длине волны $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм энергия излучения $W_1 \approx 11$ мДж, а энергия импульса на второй гармонии $W_{2\omega} \approx 0.1$ мДж при одинаковой длительности импульсов $\tau_0 \approx 80$ фс.

Возникает вопрос – как и почему добавление второй гармоники со столь слабой относительной интенсивностью (в 100 раз меньше по

сравнению с основной гармоникой) оказало столь сильное влияние на поляризационные свойства и диаграмму излучения СВЧ импульса? Автор не обсуждает этот вопрос. Как можно это понять из теоретического моделирования, представленного на рис. 37?

Отмеченные выше комментарии и вопросы не касаются основных результатов работы, никоим образом не бросают тень на их достоверность и не влияют на конечную высокую оценку диссертации. Переходя к общей оценке диссертации, стоит особо отметить тщательность проведенного в ней исследования, большое число новых экспериментальных результатов, тонкость наблюдений, детальный анализ, полученные на его основе выводы. Таким образом, диссертация автора дает много ценных экспериментальных данных, указывает на возможности для постановки новых экспериментов.

Надо отметить, что очень большая работа была проделана автором не только по проведению эксперимента, но прежде всего по изготовлению оригинальной установки, ее модернизации по ходу проведения исследования, без использования которой было бы невозможно получить уникальные экспериментальные результаты, представленные в диссертации. Автором с коллегами был проделан целый комплекс работ над совершенствованием экспериментальной установки, который, начиная от изготовления лазера накачки, также включал изготовление схем с несколькими камерами и вакуумными насосами, в которые помещались управляемая мишень, оптическая схема с зеркалами (в случае твердотельной мишени), дифракционными решетками, фильтрами, оптическим телескопом, детекторами, дополнительные источники света (разряды в газах гелия и неона) для калибровки детектируемого спектра и т.д. В процессе выполнения работы эта установка модифицировалась под новые задачи.

Большое впечатление производит оформление диссертации, которое отражает отношение диссертанта к своей работе, что делает чтение диссертации легким и интересным. Качество представления материала, сделанные им рисунки, пояснения к ним, детальное описание установок и

экспериментальных схем, тщательное обсуждение полученных результатов, использование существующих теорий в объяснении эксперимента – все сделано безупречно. Чтение диссертации увлекает еще и тем, как глубоко диссертант проникает в физическую картину изучаемых явлений. Отмечу, что мои попытки найти какие-либо серьезные недостатки не увенчались успехом.

Подытоживая, отмечаю, что намеченные М.В. Рожко цели и задачи были полностью решены им в диссертации, где он получил ряд принципиально важных экспериментальных результатов, имеющих большое значение для развития новых методов широкополосного нелинейно-оптического преобразования мощных субтераваттных сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона, их применения в области быстрой нелинейной спектроскопии, изучения быстрой динамики плазмы, методов генерации аттосекундных импульсов, генерации высоких гармоник в газовых средах и на поверхности твердотельных мишеней, в создании лазерно-плазменных источников вторичного широкополосного низкочастотного когерентного излучения в спектральном диапазоне от ТГц до СВЧ диапазона. Прделанный объем работ и полученные при этом экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой квалификации диссертанта и уровне проделанной им работы, о достоверности и новизне полученных им результатов. Также считаю полностью обоснованными сформулированные в диссертации положения и сделанные в ней рекомендации, выносимые на защиту.

Содержание автореферата и защищаемых положений полностью соответствует тексту диссертации. Основные результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в ведущих российских и международных физических журналах. Указанные в отзыве замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.

Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации «Широкополосное нелинейно-оптическое преобразование мощных сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона» соответствует специальности 1.3.19 – Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Рожко Михаил Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор Казанского национального исследовательского технического
университета им. А.Н. Туполева – КАИ,
директор Казанского квантового центра

Моисеев Сергей Андреевич

«6» окт/2023 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (843) 231-16-29;

e-mail: s.a.moiseev@kazanqc.org

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10,

Казанский национальный исследовательский технический университет им.

А.Н. Туполева – КАИ, Казанский квантовый центр

Тел.: +7 (843) 231-01-09; e-mail: kai@kai.ru

Подпись Моисеева С.А. заверяю:
ученый секретарь/кадровый работник

« » _____ 2023 г.