

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Корибута Андрея Валериевича

«Фазовая самомодуляция и вынужденное комбинационное рассеяние в кристалле вольфрамата бария и плавном кварце», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 — Лазерная физика

Диссертационная работа А.В. Корибута представляет экспериментальные результаты нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов длительностью нескольких сот фемтосекунд в прозрачных кристаллических структурах. Прежде всего исследования сконцентрированы на анализе возможностей реализации вынужденного комбинационного усиления (ВКУ) на колебательных модах вольфрамата бария. Высокоэффективное нелинейно-оптическое преобразование лазерных импульсов в длинноволновую область спектра в твердых кристаллических структурах является не теряющей своей актуальности задачей для современных оптических технологий, поэтому тематика диссертационной работы является современной, и ее выбор является обоснованным, прежде всего с точки зрения получения новых эффективных материалов и эффективных методик нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов в длинноволновую область.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списков публикаций автора и цитированной литературы. Во введении изложена актуальность тематики, связанной с использованием явления вынужденного комбинационного рассеяния кристаллических структур для получения новых спектральных компонент при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов, что определило направление исследования. Во введении также представлены научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения диссертационной работы.

Первая глава является обзорной, содержащей представление базовых физических явлений, возникающих при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в среде, таких как самофокусировка, фазовая самомодуляция, вынужденное комбинационное рассеяние. Последнее явление рассмотрено более подробно, отмечаются отличия режимов ВКУ преобразования в стационарном режиме и при использовании сверхкоротких импульсов длительностью несколько сот фемтосекунд.

Во второй главе представлены особенности экспериментальной техники на основе фемтосекундной иттербиевой волоконной лазерной системы (1030 нм) с блоком удвоения частоты основного излучения лазера, что позволяет получать импульсы на длине волны 515 нм, с энергиями микроджоулевого уровня. В работе использовались спектрометры и измерители мощности для оценки энергий получаемых лазерных импульсов и анализа спектрального преобразования. Здесь же представлено описание основных оптических характеристик использованного кристалла вольфрамата бария ($BaWO_4$), в частности подробно изложены данные определения порогов разрушения этих кристаллов.

В следующих главах содержатся основные оригинальные результаты диссертационной работы. В третьей главе рассмотрено уширение спектра импульсов накачки на частоте второй гармоники (515 нм) иттербиевой лазерной системы в модельном объекте, в качестве которого был выбран плавленый кварц. Зарегистрировано уширение спектра в результате действия фазовой самомодуляции (ФСМ), рассмотрены режимы с импульсами с пиковой мощностью выше и ниже мощности самофокусировки. Автор выделяет три характерные области, которые интерпретирует на основе упрощенной модели распространения и фокусировки гауссовых импульсов в среде. Как утверждается в работе, эта модель необходима для более полного анализа происходящих процессов в кристалле вольфрамата бария.

В четвертой главе представлены исследования спектрального преобразования импульсов накачки непосредственно в кристалле вольфрамата бария. В спектрах наблюдается преимущественное спектральное уширение в стоксовую область, что связано с особенностями свойств нелинейного показателя преломления кристалла $BaWO_4$, содержащего значительную часть, связанную с комбинационным откликом среды. В работе представлена эмпирическая модель, объясняющая экспериментальные наблюдения на основе «медленной керровской» нелинейности. На основании проведенных измерений оценены нелинейные показатели преломления кристалла вольфрамата бария.

В пятой главе представлены результаты исследования динамики формирования комбинационных линий $\nu_1=925 \text{ см}^{-1}$ и $\nu_2=330 \text{ см}^{-1}$ при нелинейно оптическом преобразовании излучения накачки в кристалле вольфрамата бария. Анализ этой динамики позволяет говорить, что уширение спектра в процессе ФСМ формирует затравочное излучение для процесса за счет ВКР. Во второй части главы приведены результаты по исследованию эффективности генерации этих линий в зависимости от параметров фокусировки, таких как, фокусное расстояние и положение линейного фокуса внутри кристалла

Подробное изложение условий эксперимента и процедуры измерений подтверждает их достоверность. Хотелось бы отметить практическую значимость результатов с точки зрения использования подобных кристаллов в качестве источников перестраиваемых спектральных компонент за счет ВКР усиления.

Однако, существует ряд замечаний.

- В работе (Глава 3) представлено исследование процесса нелинейно-оптического преобразования в плавленном кварце (что также нашло отражение в названии диссертационной работы). Плавленый кварц является наиболее распространенным материалом в оптических, в том числе волоконно-оптических технологиях. Этот материал детально исследован, в том числе определены его нелинейные и дисперсионные характеристики, проведено огромное количество исследований нелинейно-оптического преобразования. Автор использует линейную безабберационную модель распространения импульса, пытаясь описать процесс самофокусировки и уширения спектра импульсов. Выглядит это довольно странно. И если зависимость скорости линейного уширения спектра при небольших мощностях представляется достаточно реальной, то при дальнейшем нарастании энергии импульса накачки вряд ли можно считать эту модель адекватной. Поскольку просто невозможно описывать весь спектр нелинейных процессов линейными методами и оценками, тем более используя термин «геометрическая оптика». Собственно, автор и сам указывает на ограничения своей «модели», например, неучете наличия свободных электронов, которые генерируются при используемых интенсивностях и вносят вклад в формирование филамента. При мощностях накачки, превышающих P_{cr} , указывается на возможность аппроксимации экспериментальных результатов линейной зависимостью (рис.3.8), что не выглядит обоснованным, как с точки зрения теории, так и наличия значительных ошибок экспериментальных измерений (кстати, величина этих ошибок на графиках в Главе 4 в аналогичных режимах заметно меньше, что не находит своего объяснения в работе). Также для этого режима не представлено объяснений уменьшения уширения коротковолновой части спектра (рис.3.3а). Современные методы расчета, например на основе численного решения нелинейного уравнения Шредингера (ОНУШ), позволяют не только количественно, но и качественно описывать наблюдаемые явления. Поэтому хотелось бы видеть для описания наблюдаемых явлений более адекватную модель.

В четвертой главе автор наблюдает преимущественное уширение спектра в длинноволновую область при фокусировке импульсов накачки в кристалл вольфрамата бария, что объясняется наличием «медленной керровской»

нелинейности. Однако, общепринятое описание нелинейного отклика в средах с наличием комбинационно активных мод основывается на представлении нелинейного показателя преломления в виде «быстрой» электронной (керровской) нелинейности и «медленного» члена, связанного с комбинационным откликом среды. Не очень понятно обоснование представленной модели, основанной на использовании эмпирически введенного времени дефазировки (порядка 0.4 пс) и использовании «нового» термина «медленной керровской» нелинейности. Думаю, что при реальном наличии такого нового механизма, этому следовало бы посвятить отдельную диссертационную работу, а в данном случае использовать стандартную модель, в частности, учесть наличие многих низкочастотных комбинационных мод, которые представлены на рис.2.7.

В пятой главе описана динамика усиления длинноволновых компонентов колебательного спектра кристалла BaWO_4 в режиме спектрального свержуширения импульсов накачки. В принципе это явление усиления длинноволновых компонентов за счет высокочастотного крыла является достаточно изученным и явлением. И здесь необходимо повторить мысль, что для качественного объяснения наблюдаемых зависимостей необходимо осуществление детального численного анализа, а не просто приведение достаточно разрозненных аргументов, основанных на качественном моделировании фазовой само модуляции.

В работе упоминается о возможности использование двух мод $\nu_1=925 \text{ см}^{-1}$ и $\nu_2=330 \text{ см}^{-1}$, генерируемых в процессе ВКР для их практического применения, например для реализации схемы разностной частоты. Такое применение требует проведение исследований энергетических, пространственных, временных и спектрально-фазовых характеристик этих компонентов. Отсутствие этих данных не способствует утверждению об их возможном практическом применении. (Отсутствие подобных измерений и характеристики параметров генерируемого излучения характерно для диссертационной работы в целом).

Однако, эти замечания не влияют на позитивную оценку и практическую значимость полученных экспериментальных результатов, которые опубликованы в 6 статьях в журналах из перечня ВАК и докладывались на различных международных и отечественных конференциях, что подтверждает их достоверность. Автореферат адекватно отражает представленные в диссертационной работе материалы.

В целом можно заключить, что диссертационная работа А.В.Корибута «Фазовая само модуляция и вынужденное комбинационное рассеяние в кристалле вольфрамата бария и плавном кварце» является исследованием, удовлетворяющим требованиям к кандидатским диссертациям, установленным

Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а соискатель Корибут Андрей Валериевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент

Федотов Андрей Борисович

Кандидат физико-математических наук

Доцент. Физический факультет Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, кафедра общей физики и волновых процессов
1199991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2.

(Телефон: 916-4760204, E-mail: a.b.fedotov@physics.msu.ru)

А.Б.Федотов
(31 марта 2025 г.)

Список основных работ официального оппонента Федотова Андрея Борисовича по тематике диссертации Корибута Андрея Валериевича «Фазовая самомодуляция и вынужденной комбинационное рассеяние в кристалле вольфрамата бария и плавленом кварце» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Savitsky, I. V., Glek, P. B., Aliev, R. M., Stepanov, E. A., Voronin, A. A., Lanin, A. A., & Fedotov, A. B. (2024). Phase-Sensitive Plasma Nonlinearity Controlled by Ultrashort Pulses. *JETP Letters*, 120(1), 8-13.
2. Savitsky, I.V., Stepanov, E.A., A.A.Lanin, A.A., Fedotov. (2023) Mode Structure of Supercontinuum Generated by Ultrashort Pulses in Antiresonant Hollow-Core Fibers. *JETP Letters*.117(4), 286-291.
3. Savitsky, I.V., Stepanov, E.A., A.A.Lanin, A.A., Fedotov, A.B., Zheltikov, A. M. (2022). Single-cycle, multigigawatt carrier-envelope-phase-tailored near-to-mid-infrared driver for strong-field nonlinear optics. *ACS Photonics*, 9(5), 1679-1690.
4. Mitrofanov, A. V., Rozhko, M. V., Sidorov-Biryukov, D. A., Voronin, A. A., Fedotov, A. B., & Zheltikov, A. M. (2021). Near-infrared-to-vacuum-ultraviolet high-harmonic Raman and plasma emission spectroscopy with ultrashort mid-infrared laser pulses. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(12), 2089-2099.
5. Mitrofanov, A. V., Rozhko, M. V., Voronin, A. A., Sidorov-Biryukov, D. A., Fedotov, A. B., & Zheltikov, A. M. (2021). High-harmonic-driven inverse Raman scattering. *Optics Letters*, 46(13), 3219-3222.
6. Mitrofanov, A. V., Sidorov-Biryukov, D. A., Voronin, A. A., Rozhko, M. V., Glek, P. B., Nazarov, M. M., Serebryannikov, E. E., Fedotov, A. B. and Zheltikov, A. M. (2021). Enhancement of plasma nonlinearities and generation of a microwave-terahertz supercontinuum in the field of subterawatt mid-infrared pulses. *JETP Letters*, 113(5), 301-307.
7. Pochechuev, M. S., Lanin, A. A., Kelmanson, I. V., Chebotarev, A. S., Fetisova, E. S., Bilan, D. S., Shevchenko, E. K., Ivanov, A. A., Fedotov, A. B., Belousov, V. V., and Zheltikov, A. M. (2021). Multimodal nonlinear-optical imaging of nucleoli. *Optics Letters*, 46(15), 3608-3611.
8. Ivanov, A. A., Martynov, G. N., Lanin, A. A., Fedotov, A. B., & Zheltikov, A. M. (2020). High-energy self-mode-locked Cr: forsterite laser near the soliton blowup threshold. *Optics Letters*, 45(7), 1890-1893.
9. Mitrofanov, A. V., Sidorov-Biryukov, D. A., Glek, P. B., Rozhko, M. V., Stepanov, E. A., Shutov, A. D., Ryabchuk, S. V., Voronin, A. A., Fedotov, A. B., and Zheltikov, A. M. (2020). Chirp-controlled high-harmonic and attosecond-pulse generation via coherent-wake plasma emission driven by mid-infrared laser pulses. *Optics Letters*, 45(3), 750-753.