

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-602-608
УДК 608.1

Нелинейное пропускание фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия и свинца при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона

Николай Валентинович Никоноров¹, Елена Вячеславовна Колобкова²,
Антон Николаевич Цыпкин³, Азат Олфатович Исмагилов⁴, Егор Николаевич Опарин⁵,
Владимир Анатольевич Асеев⁶✉

^{1,2,3,4,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

¹ nikonov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

² kolobok106@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>

³ tsytkinan@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

⁴ ismagilov.azat@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>

⁵ oparine2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

⁶ aseev@oi.ifmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4098-2136>

Аннотация

Введение. Исследованы нелинейно оптические свойства фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия (CdS и CdSe) и свинца (PbS и PbSe) при воздействии импульсного фемтосекундного лазера ближнего инфракрасного диапазона. **Метод.** Фторфосфатные стекла с квантовыми точками получены методом высокотемпературного синтеза из шихтных реактивов с последующей дополнительной термообработкой. Нелинейное пропускание исследовалось при воздействии излучения импульсного лазера с длиной волны 1050 нм и длительностью 100 фс. **Основные результаты.** Показано, что во фторфосфатных стеклах с квантовыми точками CdS и CdSe пропускание на длине волны 1050 нм составляет 0,78 и 0,88 соответственно и практически не меняется в диапазоне падающей на стекло средней мощности фемтосекундного лазерного излучения от 30 до 2000 мВт. Для той же длины волны пропускание составило: 0,62 для образца с квантовыми точками PbS и 0,1 — для образца PbSe. Для образцов стекол с квантовыми точками PbS и PbSe обнаружено уменьшение пропускания с увеличением мощности лазерного излучения, т. е. нелинейное пропускание (лимитинг). Порог ограничения мощности проходящего через образец лазерного излучения, при которой пропускание уменьшается более чем на 20 %, для образца с квантовыми точками PbS составил 1265 мВт, а при входной мощности около 1530 мВт этот образец имел пропускание менее 0,1 %. Порог ограничения мощности лазерного излучения для образца с квантовыми точками PbSe составил 600 мВт, а при входной мощности около 750 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. **Обсуждение.** Фторфосфатные стекла с квантовыми точками PbS и PbSe можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств от импульсного лазерного излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

Ключевые слова

фторфосфатное стекло, квантовые точки сульфида кадмия, квантовые точки сульфида свинца, квантовые точки селенида кадмия, квантовые точки селенида свинца, нелинейно оптическое пропускание, нелинейно оптический лимитер

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

Ссылка для цитирования: Никоноров Н.В., Колобкова Е.В., Цыпкин А.Н., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Асеев В.А. Нелинейное пропускание фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия и свинца при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего инфракрасного диапазона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 602–608. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-602-608

© Никоноров Н.В., Колобкова Е.В., Цыпкин А.Н., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н., Асеев В.А., 2025

Nonlinear transmission of fluorophosphate glass with quantum dots of cadmium and lead sulfides and selenides under near-IR femtosecond laser irradiation

Nikolay V. Nikonorov¹, Elena V. Kolobkova², Anton N. Tsyppkin³, Azat O. Ismagilov⁴, Egor N. Oparin⁵, Vladimir A. Aseev⁶✉

^{1,2,3,4,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

¹ nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

² kolobok106@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>

³ tsypkinan@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

⁴ ismagilov.azat@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>

⁵ oparine2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

⁶ aseev@oi.ifmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4098-2136>

Abstract

Nonlinear optical properties of fluorophosphate glass with quantum dots of cadmium sulfides and selenides (CdS and CdSe) and lead (PbS and PbSe) were studied using a pulsed femtosecond near-IR laser. Fluorophosphate glasses with CdS, CdSe, PbS and PbSe quantum dots were obtained by high-temperature synthesis with additional heat treatment. Nonlinear absorption was studied under the action of a pulsed laser at a wavelength of 1050 nm and a duration of 100 fs. It is shown that the transmission at 1050 nm in fluorophosphate glasses with CdS and CdSe quantum dots is 0.78 and 0.88, respectively. In addition, increasing the average power of femtosecond laser radiation from 30 to 2000 mW does not lead to a change in their transmission. For this wavelength, the transmission was 0.1 for the sample with PbS nanocrystals and 0.65 for the sample with PbSe quantum dots. A decrease in transmission with increasing laser radiation power was shown for glass samples with PbS and PbSe quantum dots, i.e., nonlinear transmission (limiting) was observed. The threshold for limiting the power of laser radiation passing through the sample, i.e., the power at which the transmission decreases by more than 20 %, for the sample with PbS quantum dots was 1265 mW, and for an input power of about 1530 mW, this sample had a transmission of less than 0.1 %. The laser power limitation threshold for the PbSe quantum dot sample was 600 mW, and for an input power of about 750 mW it had a transmittance of less than 0.1 %. Fluorophosphate glasses with lead sulfide and selenide quantum dots can be used as limiting filters to protect photodetectors from pulsed laser radiation in the near IR range.

Keywords

fluorophosphate glass, cadmium sulfide quantum dots, lead sulfide quantum dots, cadmium selenide quantum dots, lead selenide quantum dots, nonlinear optical transmission, nonlinear optical limiter

Acknowledgements

The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-43-20020).

For citation: Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Tsyppkin A.N., Ismagilov A.O., Oparin E.N., Aseev V.A. Nonlinear transmission of fluorophosphate glass with quantum dots of cadmium and lead sulfides and selenides under near-IR femtosecond laser irradiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 602–608 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-602-608

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является защита фотоприемников от воздействия импульсного лазерного излучения в видимом и ближнем инфракрасных (ИК) диапазонах. Одним из способов решения этой проблемы является применение в системах защиты фильтров-ограничителей (фильтров-лимитеров) лазерного излучения, в которых под действием лазерного излучения происходит ослабление пропускания фильтра за счет увеличения рассеяния или поглощения, происходящих в момент прохождения лазерного импульса через фильтр. Для создания таких фильтров-лимитеров применяются разнообразные материалы: хромоформы на основе органических красителей [1, 2], композитные среды с металлическими наночастицами [3], растворы фуллеренов [4, 5], жидкости с углеродными частицами [6–10]. Несмотря на широкую номенклатуру этих материалов, а также низкий порог ограничения мощности/энергии лазерного излучения (10^{-5} – 10^{-6} Дж), при котором пропускание материалов начинает уменьшаться, и высокую величину ослабления проходящего лазерного импульса (более 1000 раз), практическое применение

их для задач защиты от импульсного лазерного излучения ограничено ввиду низких эксплуатационных характеристик. Эти материалы имеют низкую механическую, термическую и оптическую прочности, низкую химическую устойчивость, в том числе, к воздействию влаги. Кроме того, в результате воздействия лазерного излучения такие среды могут изменять свои свойства (необратимо деградировать или разрушаться), что не допускает их многократное использование, т. е. эти среды, как правило, ориентированы на одноразовое применение. Наиболее привлекательным направлением является использование в качестве фильтров-лимитеров лазерного излучения стеклокристаллических материалов, в которых наблюдается нелинейно оптическое пропускание, и которые свободны от перечисленных недостатков. Так, например, в работе [11] предложено применять калиевоалюмооборатное стекло с нанокристаллами хлорида меди. В работе [11] показано, что при воздействии лазерного излучения длительностью 5 нс на длине волны 532 нм порог ограничения энергии лазерного излучения для исходного стекла составил $E = 3 \cdot 10^{-3}$ Дж, а для стекла с нанокристаллами хлорида меди $E = 5 \cdot 10^{-6}$ Дж, т. е. практически на три порядка

меньше. Также показано, что максимальная величина ослабления проходящего лазерного импульса с энергией 0,05 Дж для исходного стекла составляет 100 раз, а для стекла с нанокристаллами хлорида 1000 раз. По сравнению с известными средами, используемыми для нелинейно оптических ограничителей, калиевоалюмооборатное стекло с нанокристаллами хлорида меди имеет более высокие эксплуатационные характеристики (например, высокую механическую и термическую прочность, абразивостойкость и химическую устойчивость), которые близки к характеристикам коммерческих оптических стекол, и допускают его многократное использование.

Следует отметить, что вопрос о создании фильтров-лимитеров лазерного излучения фемтосекундной длительности для ближнего ИК диапазона пока остается нерешенным. В то же время в работах [12–14] были изучены способы синтеза и спектральные характеристики фторфосфатных (ФФ) стекол с квантовыми точками (КТ) сульфатов и селенидов кадмия и свинца (CdS, CdSe, PbS и PbSe), а также показаны их высокие нелинейно оптические свойства и перспективы использования в качестве насыщающихся поглотителей [15, 16]. Было доказано, что ФФ стекла с CdS и CdSe характеризуются нелинейной восприимчивостью третьего порядка, в три раза превышающей этот параметр стандартных силикатных стекол [15].

В настоящей работе впервые проведены исследования нелинейного пропускания фторфосфатного стекла, легированного квантовыми точками селенидов и сульфидов кадмия и свинца, для создания на его основе нелинейно оптических фильтров-лимитеров импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности ближнего ИК диапазона.

Материалы и методы

В работе были синтезированы четыре ФФ стекла, активированные CdS, CdSe, PbS и PbSe. Исследовалось по одному образцу каждого стекла. Синтез проводился в электрической печи при температуре 1000 °С в течение 30 мин в закрытых стеклоглеродных тиглях. Выработка стекломассы выполнялась на стеклоглеродную пластину. В результате были получены прозрачные бесцветные стекла без кристаллической фазы (рис. 1, а). Размер заготовок составлял в диаметре 8–10 см толщиной 1–2 мм. КТ были выращены в процессе термообработки при температуре 390–400 °С в

муфельной печи в течении 40 мин. Температура термической обработки определялась на основании данных дифференциальной сканирующей калориметрии с применением STA 449F1 Jupiter Netzsch. Время термообработки варьировалось в пределах 30–60 мин. Для спектральных и нелинейно оптических измерений использовались полированные образцы с площадью поверхности не менее 1 см² и толщиной 1 мм (рис. 1).

Спектры поглощения образцов были измерены с применением спектрофотометра Lambda 900 PerkinElmer в диапазоне 300–2000 нм.

Принципиальная схема измерения нелинейного пропускания исследуемых образцов показана на рис. 2. Для исследования пропускания образцов использовалась лазерная фемтосекундная установка (LS) с параметрами: средняя мощность излучения до 2,0 Вт, длительность импульса 100 фс, частота повторения импульсов 70 МГц и центральная длина волны излучения 1050 нм («Авеста-Проект», Россия). Плавное изменение средней мощности лазерного излучения осуществлялось с помощью аттенюатора, состоящего из полуволновой пластинки (HWP) и поляризатора (PC). Для контроля средней мощности падающего излучения на образец в оптический путь помещалось зеркало (М), которое направляло лазерное излучение, через линзу (L1), на термоэлектрический датчик (PD1). Перед измерением средней мощности излучения, прошедшего через образец, зеркало (М) убиралось. После прошедшее через исследуемый образец (О) фемтосекундное излучение фокусировалось линзой (L2) на термоэлектрический датчик (PD2), где измерялась его средняя мощность. Пропускание определялось как отношение средней мощности прошедшего излучения к средней мощности падающего. За порог ограничения принималась средняя мощность падающего на образец лазерного излучения, при которой пропускание образца уменьшалось на 20 % относительно пропускания его исходного состояния.

Для исключения изменения свойств стекла под действием мощного лазерного излучения и возможного изменения пропускания стекла, эксперимент повторялся 5 раз в одной и той же области образца через определенные промежутки времени.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены спектры оптической плотности ФФ стекол с КТ CdS и CdSe (рис. 3, а), а также с КТ PbS и PbSe (рис. 3, б). На основании величины энер-

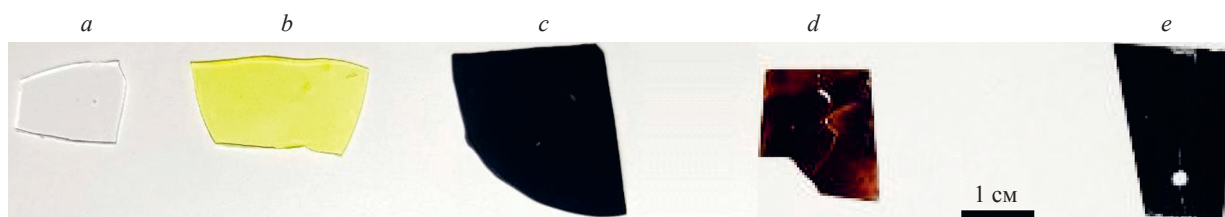


Рис. 1. Фотографии исследуемых образцов фторфосфатных стекол: исходный образец с прекурсорами Cd и S (а) и образцы с квантовыми точками после термообработки при 390 °С: CdS (b); CdSe (c); PbS (d); PbSe (e)

Fig. 1. Photographs of the samples of fluorophosphate glasses studied: the initial sample with Cd and S precursors (a) and samples with quantum dots after heat treatment at 390 °С: CdS (b); CdSe (c); PbS (d); PbSe (e)

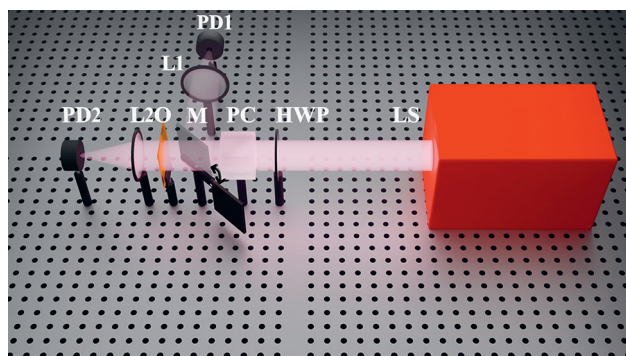


Рис. 2. Экспериментальная схема измерения пропускания образцов фторфосфатных стекол при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на длине волны 1050 нм: LS — фемтосекундный лазер; HWP — четвертьволновая пластина; PC — поляризатор; O — исследуемый образец; L1,2 — линзы; PD1,2 — фотоприемники

Fig. 2. Experimental setup: LS — femtosecond laser; HWP — quarter-wave plate; PC — polarizer; O — sample under study; L1,2 — lenses; PD1,2 — photodetectors

гий первого возбужденного состояния экситона по методике, описанной в [17, 18], были определены размеры КТ CdS и CdSe, которые соответствовали 3,0 и 2,3 нм, а также КТ PbS и PbSe, которые составили около 3 нм. Из рис. 3, а видно, что длина волны первого возбужденного состояния экситона для ФФ стекол с КТ CdS составляет около 380 нм, а для ФФ стекол с КТ CdSe около 515 нм. При этом длина волны возбуждения лазерного излучения 1050 нм более чем в два раза превышает длину волны первого возбужденного состояния для ФФ стекол с КТ CdS и CdSe. В отличие от ФФ стекол с КТ CdS и CdSe принципиально другая ситуация наблюдается для ФФ стекол с КТ PbS и PbSe: длина волны возбуждения лазерного излучения 1050 нм близка к длинам волн для первого резонанса, которые состав-

ляют для ФФ стекол с КТ PbS около 980 нм, а для ФФ стекол с КТ PbSe около 1090 нм (рис. 3, б). Оптическая плотность на длине волны 1050 нм для стекла с КТ PbS равна 2,7, а для стекла с КТ PbSe равна 0,6. Таким образом, для стекол с КТ CdS, CdSe нелинейное поглощение может осуществляться только по двухфотонному механизму, в то время как для стекол с КТ PbS и PbSe должно происходить резонансное поглощение.

Исследования пропускания образцов ФФ стекол при воздействии лазерного излучения разной мощности показали следующие результаты. Для образцов с КТ CdS и CdSe пропускание практически не менялось в широких пределах входной мощности излучения от 30 до 2000 мВт на длине волны 1050 нм (рис. 4) и составляло 0,78 и 0,88 соответственно. В данном диапазоне мощностей наблюдалось линейное пропускание, т. е. выполнялся закон Бугера–Ламберта–Бера.

Более сложный характер зависимости пропускания от мощности лазерного излучения на длине волны 1050 нм имели образцы с КТ PbS и PbSe. Для данных образцов можно выделить два диапазона, когда пропускание не зависит от мощности падающего излучения (выполняется линейный закон Бугера–Ламберта–Бера) и уменьшается при увеличении мощности (закон Бугера–Ламберта–Бера не выполняется).

Для образца с КТ PbS начальное пропускание составило 0,62, при этом оно не изменялось в пределах диапазона мощности входного излучения 30–1265 мВт. При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения пропускание снижалось и при мощности 1650 мВт составило меньше 0,01. Аналогичный характер наблюдался для образца с PbSe: начальное пропускание составило 0,1, при этом оно не изменялось в пределах изменения мощности входного излучения 30–520 мВт. При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения пропускание снижалось и при мощности 720 мВт составляло уже меньше 0,01. Таким образом, порог ограничения мощности проходящего

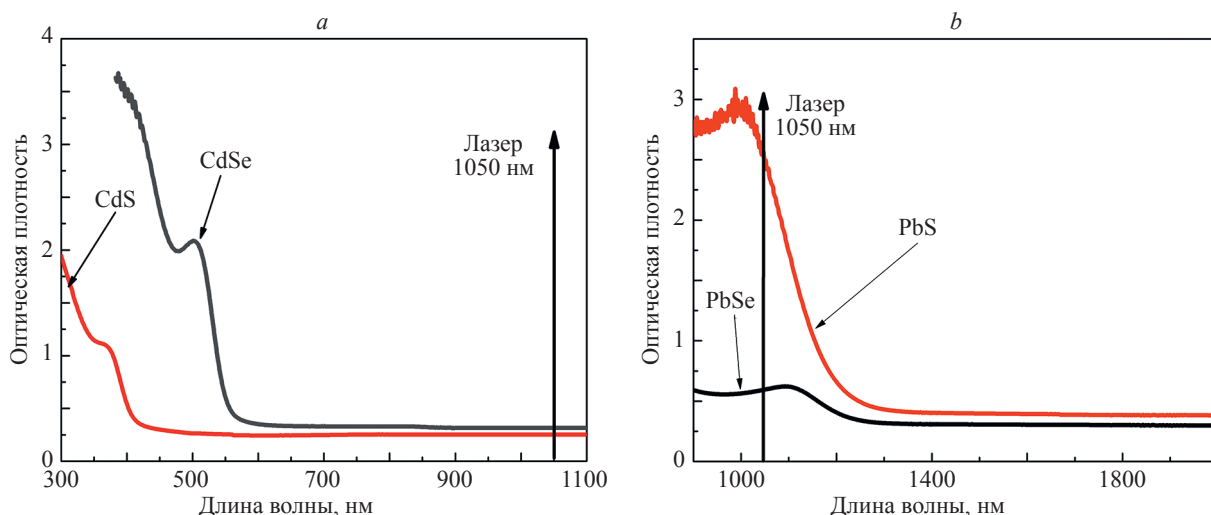


Рис. 3. Спектры оптической плотности фторфосфатных стекол с квантовыми точками CdS, CdSe (а), PbS и PbSe (б). Указано положение лазерного излучения (1050 нм) относительно полос поглощения стекол с квантовыми точками

Fig. 3. Absorbance spectra of fluorophosphate glasses with quantum dots CdS, CdSe (a), PbS and PbSe (b). The position of the laser radiation (1050 nm) is indicated relative to the absorption bands of glasses with quantum dots

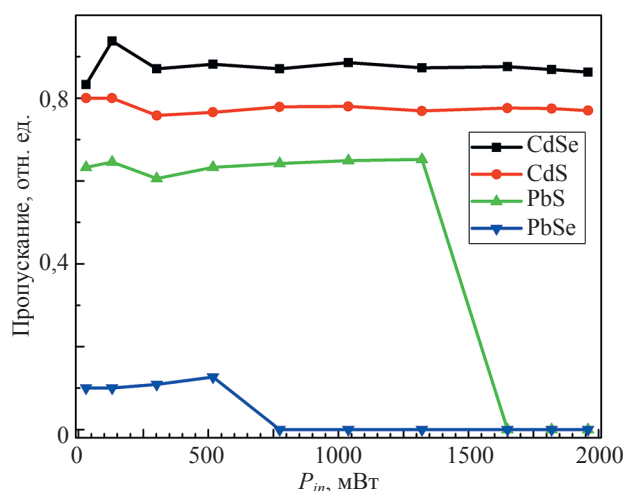


Рис. 4. Зависимость пропускания исследуемых образцов фторфосфатных стекол с квантовыми точками CdS и CdSe и PbS и PbSe от мощности (P_{in}) падающего на них фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1050 нм

Fig. 4. Transmission dependence on laser radiation power in fluorophosphate glasses with CdS and CdSe and PbS and PbSe quantum dots

лазерного излучения для образца с КТ PbS составил 1450 мВт, а для образца с КТ PbSe — 670 мВт.

Отклонение от линейного закона Бугера–Ламберта–Бера связано с нелинейными процессами, наблюдаемыми при прохождении мощного лазерного излучения через стекло с КТ, и которое можно объяснить при помощи эффекта обратимого насыщаемого поглощения [19]. В этом случае при низкой интенсивности падающего излучения КТ поглощают слабо. При увеличении интенсивности начинают заселяться возбужденные состояния, которые имеют большее сечение поглощения, чем основное состояние, что может приводить к падению пропускания. Также важное значение может иметь наличие примесных уровней в запрещенной зоне полупроводниковых КТ PbS и PbSe, так называемые «глубокие примесные состояния», которые могут играть роль «мостиков» для электронов при нелинейном поглощении. С них может осуществляться переход электронов в зону проводимости при высоких интенсивностях лазерного излучения. Известно, что наличие таких примесных уровней при высоких интенсивностях проявляется также, как и двухфотонное поглощение [12–18, 20–25]. Отметим, что более подробное изучение механизмов нелинейного пропускания требует отдельных исследований.

В результате проведения экспериментов не наблюдались эффекты, связанные с образованием дефектов, деформацией или оптическим разрушением ФФ стекла при воздействии лазерного излучения.

Таким образом, можно заключить, что ФФ стекла с КТ PbS и PbSe имеют нелинейный характер уменьшения пропускания от мощности падающего излучения фемтосекундной длительности, и такое ограничение мощности можно использовать для создания эффективных фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств, работающих в ближнем ИК диапазоне.

Следует отметить следующие достоинства ФФ стекол с КТ PbS и PbSe по сравнению с известными средами, используемыми для нелинейно оптических фильтров-ограничителей. Прежде всего, это высокая объемная доля КТ CdS, CdSe, PbS и PbSe, которая может быть реализована во ФФ стекле по сравнению с известными силикатными матрицами вследствие сохранения при синтезе в расплаве ФФ стекол высоких концентраций серы и селена. Эта особенность ФФ стекол позволяет формировать КТ в широких диапазонах размеров и концентраций при использовании значительно более низких температур синтеза стекол и меньшего времени термообработки, по сравнению с технологическими условиями синтеза силикатных стекол. Также можно отметить высокую механическую и термическую прочности ФФ стекла. Например, в работах [26, 27] показано, что эксплуатационные характеристики ФФ стекла близки к характеристикам лазерных фосфатных стекол. Кроме того, ФФ стекло не изменяет свои свойства при его хранении, т. е. обладает высокой стойкостью к атмосферным воздействиям, а также не разрушается при воздействии на него лазерного импульсного излучения с высокими интенсивностями [26, 27]. Исследованные ФФ стекла по сравнению с известными «одноразовыми» средами для нелинейно оптических фильтров-ограничителей (красителями, растворами фуллеренов и т. д.) допускают их многократное использование.

Заключение

Исследованы нелинейное пропускание фторфосфатного стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов кадмия и свинца при воздействии импульсного фемтосекундного (100 фс) лазера ближнего инфракрасного диапазона с длиной волны 1050 нм. Показано, что во фторфосфатных стеклах с квантовыми точками сульфида и селенида кадмия пропускание на длине волны 1050 нм практически не изменяется при различной мощности (от 30 до 2000 мВт) падающего излучения и составляет, соответственно, 0,78 и 0,88. Образцы с квантовыми точками сульфида и селенида свинца показывают нелинейный характер зависимости пропускания от мощности лазерного излучения. Порог уменьшения (ограничения) мощности проходящего через образец лазерного излучения, при которой пропускание уменьшалось более чем на 20 %, для образца с квантовыми точками сульфида свинца составил 1265 мВт, а при входной мощности около 1530 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. Порог ограничения мощности лазерного излучения для образца с квантовыми точками селенида свинца составил 600 мВт, а при входной мощности порядка 750 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. Можно сделать вывод о том, что фторфосфатные стекла с квантовыми точками сульфида и селенида свинца можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств от импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности в ближнем инфракрасном диапазоне.

Литература

1. Shirk J.S., Pong R.G.S., Flom S.R., Boyle M.E., Snow A.W. Materials for reverse saturable absorption optical limiters // *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 1994. V. 374. P. 201–209. <https://doi.org/10.1557/PROC-374-201>
2. Hollins R.C. Materials for optical limiters // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 1999. V. 4. N 2. P. 189–196. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(99\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(99)00009-1)
3. Wang J., Blau W.J. Inorganic and hybrid nanostructures for optical limiting // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2009. V. 11. N 2. P. 024001. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/2/024001>
4. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., McCahon S.W., Haeri M.B., Ehrhitz M.E. Optical limiting with C60 solutions // *Proceedings of SPIE*. 1994. V. 2229. P. 78–90.
5. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., Withers J.C., Loufty R.O., Haeri M.B., Ehrhitz M.E. Fullerene-based large-area passive broadband laser filters // *Proceedings of SPIE*. 1994. V. 2284. P. 208–219. <https://doi.org/10.1117/12.196131>
6. Vincent D., Petit S., Chin S.L. Optical limiting studies in a carbon-black suspension for subnanosecond and subpicosecond laser pulses // *Applied Optics*. 2002. V. 41. N 15. P. 2944–2946. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002944>
7. Wang J., Chen Y., Blau W.J. Carbon nanotubes and nanotube composites for nonlinear optical devices // *Journal of Materials Chemistry*. 2009. V. 19. N 40. P. 7425–7443. <https://doi.org/10.1039/b906294g>
8. Koudoumas E., Kokkinaki O., Konstantaki M., Couris S., Korovin S., Detkov P., Kuznetsov V., Pimenov S., Pustovoi V. Onion-like carbon and diamond nanoparticles for optical limiting // *Chemical Physics Letters*. 2002. V. 357. N 5–6. P. 336–340. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00557-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00557-2)
9. Wang J., Früchtl D., Blau W.J. The importance of solvent properties for optical limiting of carbon nanotube dispersions // *Optics Communications*. 2010. V. 283. N 3. P. 464–468. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.10.020>
10. Venediktova A.V., Vlasov A.Y., Obratsova E.D., Videnichev D.A., Kislyakov I.M., Sokolova E.P. Stability and optical limiting properties of a single wall carbon nanotubes dispersion in a binary water-glycerol solvent // *Applied Physics Letters*. 2012. V. 100. N 25. P. 251903. <https://doi.org/10.1063/1.4729790>
11. Ширшнев П.С., Никоноров Н.В., Соболев Д.И., Ким А.А., Кисляков И.М., Поваров С.С., Белоусова И.М. Нелинейно оптический лимитер импульсного лазерного излучения на основе калиевоалюмооборатного стекла с нанокристаллами хлорида меди // *Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 10. С. 69–74.
12. Lipovskii A.A., Yakovlev I.E., Kolobkova E.V., Petrikov V.D. Formation and growth of semiconductor nanocrystals in phosphate glass matrix // *Journal of the European Ceramic Society*. 1999. V. 19. N 6-7. P. 865–869. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(98\)00333-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00333-1)
13. Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Melekhin V.G. Fluorophosphate glasses with quantum dots based on lead sulfide // *Glass Physics and Chemistry*. 2002. V. 28. N 4. P. 251–255. <https://doi.org/10.1023/A:1019918530283>
14. Kolobkova E.V., Polyakova A.V., Abdrshin A.N., Nikonov N.V., Aseev V.A. Nanostructured glass ceramic based on fluorophosphate glass with PbSe quantum dots // *Glass Physics and Chemistry*. 2015. V. 41. N 1. P. 127–131. <https://doi.org/10.1134/S1087659615010137>
15. Melekhin V.G., Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Malyarevich A.M., Savitsky V.G. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics // *Glass Physics and Chemistry*. 2008. V. 34. N 4. P. 351–355. <https://doi.org/10.1134/s1087659608040020>
16. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of CdSxSe1-X microcrystals in fluorine-phosphate glass // *Optics Communications*. 1996. V. 132. N 3-4. P. 307–310. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(96\)00373-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00373-2)
17. William Yu W., Lianhua Qu, Wenzhuo Guo, and Xiaogang Peng. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals // *Chemistry of Materials*. 2003. V. 15. N 14. P. 2854–2860. <https://doi.org/10.1021/cm034081k>
18. Allan G., Delerue C. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals // *Physical Review B*. 2004. V. 70. N 24. P. 245321. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.245321>
19. Kolobkova E., Lipatova Z., Abdrshin A., Nikonov N. Luminescent properties of fluorine phosphate glasses doped with PbSe and PbS

References

1. Shirk J.S., Pong R.G.S., Flom S.R., Boyle M.E., Snow A.W. Materials for reverse saturable absorption optical limiters. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1994, vol. 374, pp. 201–209. <https://doi.org/10.1557/PROC-374-201>
2. Hollins R.C. Materials for optical limiters. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1999, vol. 4, no. 2, pp. 189–196. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(99\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(99)00009-1)
3. Wang J., Blau W.J. Inorganic and hybrid nanostructures for optical limiting. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, vol. 11, no. 2, pp. 024001. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/2/024001>
4. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., McCahon S.W., Haeri M.B., Ehrhitz M.E. Optical limiting with C60 solutions. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2229, pp. 78–90.
5. Kost A., Jensen J.E., Klein M.B., Withers J.C., Loufty R.O., Haeri M.B., Ehrhitz M.E. Fullerene-based large-area passive broadband laser filters. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2284, pp. 208–219. <https://doi.org/10.1117/12.196131>
6. Vincent D., Petit S., Chin S.L. Optical limiting studies in a carbon-black suspension for subnanosecond and subpicosecond laser pulses. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 15, pp. 2944–2946. <https://doi.org/10.1364/AO.41.002944>
7. Wang J., Chen Y., Blau W.J. Carbon nanotubes and nanotube composites for nonlinear optical devices. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, vol. 19, no. 40, pp. 7425–7443. <https://doi.org/10.1039/b906294g>
8. Koudoumas E., Kokkinaki O., Konstantaki M., Couris S., Korovin S., Detkov P., Kuznetsov V., Pimenov S., Pustovoi V. Onion-like carbon and diamond nanoparticles for optical limiting. *Chemical Physics Letters*, 2002, vol. 357, no. 5–6, pp. 336–340. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00557-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00557-2)
9. Wang J., Früchtl D., Blau W.J. The importance of solvent properties for optical limiting of carbon nanotube dispersions. *Optics Communications*, 2010, vol. 283, no. 3, pp. 464–468. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.10.020>
10. Venediktova A.V., Vlasov A.Y., Obratsova E.D., Videnichev D.A., Kislyakov I.M., Sokolova E.P. Stability and optical limiting properties of a single wall carbon nanotubes dispersion in a binary water-glycerol solvent. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no. 25, pp. 251903. <https://doi.org/10.1063/1.4729790>
11. Shirshnev P.S., Nikonov N.V., Sobolev D.I., Kim A.A., Kislyakov I.M., Povarov S.S., Belousova I.M. Nonlinear optical limiter of pulsed laser radiation based on potassium–aluminum–borate glass with copper chloride nanocrystals. *Journal of Optical Technology*. 2017, vol. 84, no. 10, pp. 705–709. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000705>
12. Lipovskii A.A., Yakovlev I.E., Kolobkova E.V., Petrikov V.D. Formation and growth of semiconductor nanocrystals in phosphate glass matrix. *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, vol. 19, no. 6-7, pp. 865–869. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(98\)00333-1](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(98)00333-1)
13. Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Melekhin V.G. Fluorophosphate glasses with quantum dots based on lead sulfide. *Glass Physics and Chemistry*, 2002, vol. 28, no. 4, pp. 251–255. <https://doi.org/10.1023/A:1019918530283>
14. Kolobkova E.V., Polyakova A.V., Abdrshin A.N., Nikonov N.V., Aseev V.A. Nanostructured glass ceramic based on fluorophosphate glass with PbSe quantum dots. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 127–131. <https://doi.org/10.1134/S1087659615010137>
15. Melekhin V.G., Kolobkova E.V., Lipovskii A.A., Petrikov V.D., Malyarevich A.M., Savitsky V.G. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics. *Glass Physics and Chemistry*, 2008, vol. 34, no. 4, pp. 351–355. <https://doi.org/10.1134/s1087659608040020>
16. Vaynberg B., Matusovsky M., Rosenbluh M., Kolobkova E., Lipovskii A. High optical nonlinearity of CdSxSe1-X microcrystals in fluorine-phosphate glass. *Optics Communications*, 1996, vol. 132, no. 3-4, pp. 307–310. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(96\)00373-2](https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00373-2)
17. William Yu W., Lianhua Qu, Wenzhuo Guo, and Xiaogang Peng. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals. *Chemistry of Materials*, 2003, vol. 15, no. 14, pp. 2854–2860. <https://doi.org/10.1021/cm034081k>
18. Allan G., Delerue C. Confinement effects in PbSe quantum wells and nanocrystals. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, no. 24, pp. 245321. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.245321>

- quantum dots // *Optical Materials*. 2017. V. 65. P. 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.033>
20. Boyd R.W., Gaeta A.L., Giese E. Nonlinear optics // *Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics*. 2023. P. 1097–1110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73893-8_76
 21. Yu J., Durmusoglu E.G., Ren Y., Fang W., Zhou Y., Chu L., Liu B., Demir H.V. Dual type-II colloidal quantum wells for efficient nonlinear optical limiting // *ACS Nano*. 2025. V. 19. N 9. P. 9273–9281. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c00391>
 22. Дворников Д.П., Ивченко Е.Л., Першин В.В., Ярошецкий И.Д. О влиянии переходов через глубокие примесные центры на процессе нелинейного поглощения в полупроводниках // *Физика и техника полупроводников*. 1976. Т. 10. № 12. С. 2316–2320.
 23. Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Миронов А.Б., Полуэктов И.А. О спектре двухфотонного межзонного поглощения лазерного излучения в GaAs // *Физика и техника полупроводников*. 1976. Т. 10. № 2. С. 262–270.
 24. Арешев И.И. О двухфотонном межзонном поглощении лазерного излучения в полупроводниках с участием примесных уровней // *Физика и техника полупроводников*. 1977. Т. 11. № 5. С. 962–964.
 25. Балтрамеюнас Р.А., Вайткус Ю.Ю., Гаврюшин В.И. Поглощение света неравновесными двухфотонно генерируемыми свободными и локализованными носителями в монокристаллах ZnTe // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1984. Т. 87. № 1. С. 74–83.
 26. Kolobkova E., Alkhlef A., Mironov L.Y., Bogdanov O. Effect of the phosphate content on the spectroscopic and lasing properties of Er³⁺/Yb³⁺-doped fluorophosphate glasses // *Ceramics International*. 2020. V. 46. N 16. Part B. P. 26396–26402. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.221>
 27. Bogdanov O.A., Kolobkova E.V., Perevislov S.N. Thermomechanical properties and structure of fluorophosphate glasses activated with Nd³⁺ at different concentrations of Ba(PO₃)₂ // *Glass Physics and Chemistry*. 2021. V. 47. N 4. P. 334–339. <https://doi.org/10.1134/S1087659621040052>
 19. Kolobkova E., Lipatova Z., Abdrshin A., Nikonov N. Luminescent properties of fluorine phosphate glasses doped with PbSe and PbS quantum dots. *Optical Materials*, 2017, vol. 65, pp. 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.09.033>
 20. Boyd R.W., Gaeta A.L., Giese E. Nonlinear optics. *Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2023, pp. 1097–1110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73893-8_76
 21. Yu J., Durmusoglu E.G., Ren Y., Fang W., Zhou Y., Chu L., Liu B., Demir H.V. Dual type-II colloidal quantum wells for efficient nonlinear optical limiting. *ACS Nano*, 2025, vol. 19, no. 9, pp. 9273–9281. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c00391>
 22. Dvornikov D.P., Ivchenko E.L., Pershin V.V., Yaroshetskii I.D. The influence of transitions through deep impurity centers on the process of nonlinear absorption in semiconductors. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1976, vol. 10, no. 12, pp. 2316–2320. (in Russian)
 23. Grasyuk A.Z., Zubarev I.G., Mironov A.B., Poluektov I.A. The spectrum of a two-photon interband impurity absorption of laser radiation in GaAs. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1976, vol. 10, no. 2, pp. 262–270. (in Russian)
 24. Areshev I.I. Two-photon interband absorption of laser radiation in semiconductors with the participation of impurity levels. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 1977, vol. 11, no. 5, pp. 962–964. (in Russian)
 25. Baltranyunas R.A., Vaitkus Yu.Yu., Gavryushin V.I. Light absorption by nonequilibrium, two-photon-generated, free and localized carriers in ZnTe. *Soviet Physics — JETP*, 1984, vol. 60, no. 1, pp. 43–48.
 26. Kolobkova E., Alkhlef A., Mironov L.Y., Bogdanov O. Effect of the phosphate content on the spectroscopic and lasing properties of Er³⁺/Yb³⁺-doped fluorophosphate glasses. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 16, part B, pp. 26396–26402. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.221>
 27. Bogdanov O.A., Kolobkova E.V., Perevislov S.N. Thermomechanical properties and structure of fluorophosphate glasses activated with Nd³⁺ at different concentrations of Ba(PO₃)₂. *Glass Physics and Chemistry*, 2021, vol. 47, no. 4, pp. 334–339. <https://doi.org/10.1134/S1087659621040052>

Авторы

Никоноров Николай Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор, ведущий профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, nikonorov@oi.ifmo.ru

Колобкова Елена Вячеславовна — доктор химических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация; профессор практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57604636700](https://orcid.org/0000-0002-0134-8434), <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>, kolobok106@rambler.ru

Цыпкин Антон Николаевич — доктор физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56366230300](https://orcid.org/0000-0002-9254-1116), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, tsyppkinan@itmo.ru

Исмагилов Азат Олфатович — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195673891](https://orcid.org/0000-0002-5844-2966), <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>, ismagilov.azat@itmo.ru

Опарин Егор Николаевич — аспирант, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57209803630](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>, oparine2@gmail.com

Асеев Владимир Анатольевич — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7004254881](https://orcid.org/0000-0003-4098-2136), <https://orcid.org/0000-0003-4098-2136>, aseev@oi.ifmo.ru

Authors

Nikolay V. Nikonorov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, nikonorov@oi.ifmo.ru

Elena V. Kolobkova — D.Sc. (Chemistry), Full Professor, Saint Petersburg State Institute of Technology; Saint Petersburg, 190013, Russian Federation; Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57604636700](https://orcid.org/0000-0002-0134-8434), <https://orcid.org/0000-0002-0134-8434>, kolobok106@rambler.ru

Anton N. Tsyppkin — D.Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56366230300](https://orcid.org/0000-0002-9254-1116), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, tsyppkinan@itmo.ru

Azat O. Ismagilov — PhD (Physics & Mathematics), Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195673891](https://orcid.org/0000-0002-5844-2966), <https://orcid.org/0000-0002-5844-2966>, ismagilov.azat@itmo.ru

Egor N. Oparin — PhD Student, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57209803630](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>, oparine2@gmail.com

Vladimir A. Aseev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7004254881](https://orcid.org/0000-0003-4098-2136), <https://orcid.org/0000-0003-4098-2136>, aseev@oi.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 12.04.2025

Одобрена после рецензирования 08.06.2025

Принята к печати 21.07.2025

Received 12.04.2025

Approved after reviewing 08.06.2025

Accepted 21.07.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»