

ISSN 1561-2430 (Print)  
ISSN 2524-2415 (Online)  
УДК 535.34+621.375.8  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-99-107>

Поступила в редакцию 11.02.2021  
Received 11.02.2021

**С. А. Тихомиров**

*Институт физики им. Б. И. Степанова  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

## СВЕРХБЫСТРАЯ ДИНАМИКА И МЕХАНИЗМЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ТОНКИХ ОБРАЗЦАХ СЕЛЕНИДА ГАЛЛИЯ

**Аннотация.** На основе использования методов фемтосекундной кинетической спектроскопии исследована динамика наведенного поглощения в тонких образцах селенида галлия при различных условиях возбуждения. Зарегистрировано несколько типов наведенных изменений, включая наведенное поглощение на свободных носителях заряда («горячих» и термализованных электронах), просветление и поглощение, обусловленное заселением прикраевых ловушечных (экситонных) состояний, а также быстрые изменения поглощения зондирующего излучения в области перекрытия возбуждающего и зондирующего импульсов, обусловленные двухквантовыми двухчастотными межзонными переходами. Оценены временные диапазоны реализующихся релаксационных процессов. Показано, что при использовании относительно малоинтенсивного длинноволнового возбуждения (790 нм) происходит преимущественно резонансное возбуждение прикраевых состояний за счет двухквантовых двухчастотных переходов с последующим установлением динамического равновесия между связанными и свободными электронами во временном диапазоне до 5 пс. При возбуждении электронов глубоко в зону проводимости с образованием горячих свободных электронов и их последующей термализацией ко дну зоны проводимости во временном диапазоне до 1 пс заселение прикраевых состояний и установление динамического равновесия реализуется в том же временном диапазоне (5 пс), что и при возбуждении «снизу».

**Ключевые слова:** нестационарные спектры поглощения, фемтосекундная спектроскопия, селенид галлия, возбужденные носители заряда, релаксационные процессы

**Для цитирования:** Тихомиров, С. А. Сверхбыстрая динамика и механизмы нестационарного поглощения в тонких образцах селенида галлия / С. А. Тихомиров // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 99–107. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-99-107>

**Sergei A. Tikhomirov**

*B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## ULTRAFAST DYNAMICS AND MECHANISMS OF NON-STATIONARY ABSORPTION IN THIN GALLIUM SELENIDE SAMPLES

**Abstract.** Herein, the dynamics and mechanisms of induced absorption in thin samples of gallium selenide under various excitation conditions are studied using femtosecond kinetic spectroscopy. We have registered several types of induced changes including induced absorption on free charge carriers (“hot” and thermalized electrons), bleaching and absorption due to the population of near-edge trap or exciton states, as well as rapid changes in the absorption of probing radiation in the region of the overlap of the exciting and probing pulses due to two-quantum two-frequency interband transitions. The time ranges of the relaxation processes are estimated. It is shown that when using relatively low-intensity long-wave excitation (790 nm), the resonant excitation of the near-edge states occurs mainly due to two-quantum two-frequency transitions followed by the formation of the dynamic equilibrium between bound and free electrons in the time range up to 5 ps. When electrons are excited deeply into the conduction band with the formation of hot free electrons and their subsequent thermalization to the bottom of the conduction band in the time range up to 1 ps, the population of the near-edge states and the establishment of the dynamic equilibrium between bound and free electrons is realized in the same time range (5 ps) as when they are excited “from below”.

**Keywords:** non-stationary absorption spectra, femtosecond spectroscopy, gallium selenide, excited charge carriers, relaxation processes

**For citation.** Tikhomirov S. A. Ultrafast dynamics and mechanisms of non-stationary absorption in thin gallium selenide samples. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 99–107 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-99-107>

**Введение.** Кристаллы GaSe и их легированные модификации широко используются для преобразования частоты фемтосекундных лазеров в средний ИК-диапазон методом генерации разностных частот и бегущих волн для генерации ТГц-излучения и, в целом, как нелинейно-оптические кристаллы для преобразования частоты в среднем ИК-диапазоне [1–3].

Многие уникальные свойства кристаллов обусловлены их слоистой структурой, характеризующейся сильной ковалентной связью в пределах слоя и слабой электростатической связью между слоями. К замечательным физическим свойствам кристаллов GaSe можно отнести экстремально ширину диапазона прозрачности 0,62–20 мкм и  $\geq 50$  мкм, высокую лучевую прочность, большую теплопроводность вдоль слоев роста [4–5]. В то же время слоистая структура и специфика межслоевой связи обуславливают очень низкие механические свойства кристаллов GaSe (почти нулевую твердость по шкале Мооса и исключительную легкость их расслоения), что затрудняет практическое использование непосредственно самих кристаллов GaSe в технических приложениях. Однако данное соединение легко легируется изовалентными химическими элементами, что позволяет на его основе выращивать кристаллы, наследующие лучшие физические свойства исходных кристаллов с приобретением более высоких механических, тепловых, оптических и других характеристик, ответственных за эксплуатационные свойства [6].

Перспективы широкого применения легированных кристаллов GaSe в нелинейной оптике, в частности для получения сверхкоротких перестраиваемых импульсов излучения в среднем ИК- и ТГц-диапазоне, делают востребованной информацию о сверхбыстрой динамике и механизмах релаксации носителей зарядов, возбуждаемых в таких системах фемтосекундными световыми импульсами. Наряду с этим в литературе практически отсутствуют работы по фемтосекундной спектроскопии селенида галлия.

Следует особенно подчеркнуть, что отмеченное выше свойство расслоения кристаллов GaSe для экспериментов по фемтосекундной спектроскопии является весьма полезным, поскольку дает возможность легко получать сверхтонкие образцы материала достаточно высокого оптического качества, что необходимо для минимизации вклада дисперсии групповых скоростей накачки и зонда в измеряемую кинетику наведенной оптической плотности.

В настоящей статье приводятся результаты исследования динамики нестационарных спектров поглощения тонких образцов селенида галлия, регистрируемых при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами. Цель работы заключается в установлении механизмов процессов, обуславливающих наблюдаемую спектрально-временную динамику наведенной оптической плотности в широкой спектральной области.

**Методика измерений.** Основными объектами исследования являлись тонкие пленки GaSe, получаемые расслоением исходных образцов GaSe, предоставленных доктором Ю. М. Андреевым (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия). Толщина пленок определялась из интерференционной картины в спектре пропускания образцов (рис. 1).

Стационарные спектры поглощения образцов записывались на спектрофотометре Cary 500.

Нестационарные спектры поглощения регистрировались с использованием фемтосекундного спектрометра [7], в основе которого лежит оригинальный генератор фемтосекундных импульсов на Ti:Sp, синхронно накачиваемый импульсным лазером на Nd:YAG с пассивной синхронизацией мод и отрицательной обратной связью. Данная система позволяет после соответствующего усиления получать с частотой 10 Гц перестраиваемые в спектральном диапазоне от 770 до 810 нм импульсы длительностью  $\tau \sim 140$  фс и энергией до 1 мДж.

Использовалась известная методика возбуждения-зондирования (pump-probe method) с регулируемым временным интервалом между импульсами возбуждающего и пробного излучения. Возбуждение образцов производилось излучением первой и второй гармониками титан-сапфирового лазера, зондирование – широкополосным фемтосекундным суперконтинуумом, генерация которого осуществлялась путем фокусировки части излучения основной частоты лазера в кювете с водой. Это позволяло зондировать с заданной временной задержкой исследуемые образцы на любой длине волны в спектральном интервале 400–1100 нм, определяемом спектральной чувствительностью кремниевой матрицы.

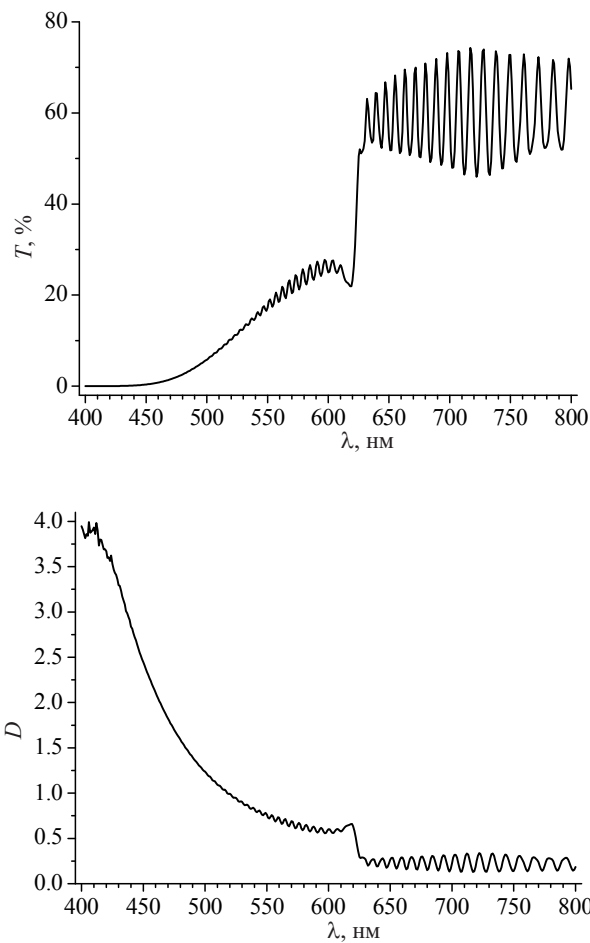


Рис. 1. Спектры пропускания и поглощения пленки GaSe. Толщина образца, оцененная из интерференционной картины, составляет ~10 мкм

Fig. 1. Transmission and absorption spectra of the GaSe film. The sample thickness estimated from the interference pattern is ~10 microns

В спектрометре реализована двухлучевая схема измерений. Коллимированный пучок излучения суперконтинуума с помощью полупрозрачного металлического зеркала делится на два пучка с примерно равной энергией. Один из них проходит через исследуемый образец до прихода возбуждающего импульса и используется в качестве опорного сигнала. Второй пучок пропускается через образец, пройдя регулируемую линию задержки, и служит зондирующим сигналом. Затем оба пучка поступают на входную щель полихроматора, и их спектры регистрируются охлаждаемой ПЗС-матрицей. Оцифрованные сигналы с матрицы подаются на вход персонального компьютера и обрабатываются для определения спектральных изменений оптической плотности  $\Delta D$  согласно формуле

$$\Delta D(\lambda, t) = \lg(T_0/T),$$

где  $T = I_{\text{зонд}}/I_{\text{оп}}$ ,  $T_0 = I_{\text{зонд}}^0/I_{\text{оп}}^0$  – отношения энергий зондирующего и опорного импульсов, прошедших через исследуемый образец при возбуждении и без него соответственно. При построении нестационарных спектров для фиксированных временных задержек проводилась коррекция, учитывающая возникновение дополнительных временных задержек спектральных компонент широкополосного континуума относительно возбуждающего импульса вследствие дисперсии показателя преломления оптических элементов в канале зондирования.

**Результаты и обсуждение.** На рис. 2 приведены нестационарные спектры наведенного поглощения, полученные при разных уровнях возбуждения образца как второй гармоникой титан-сапфирового лазера, так и первой.

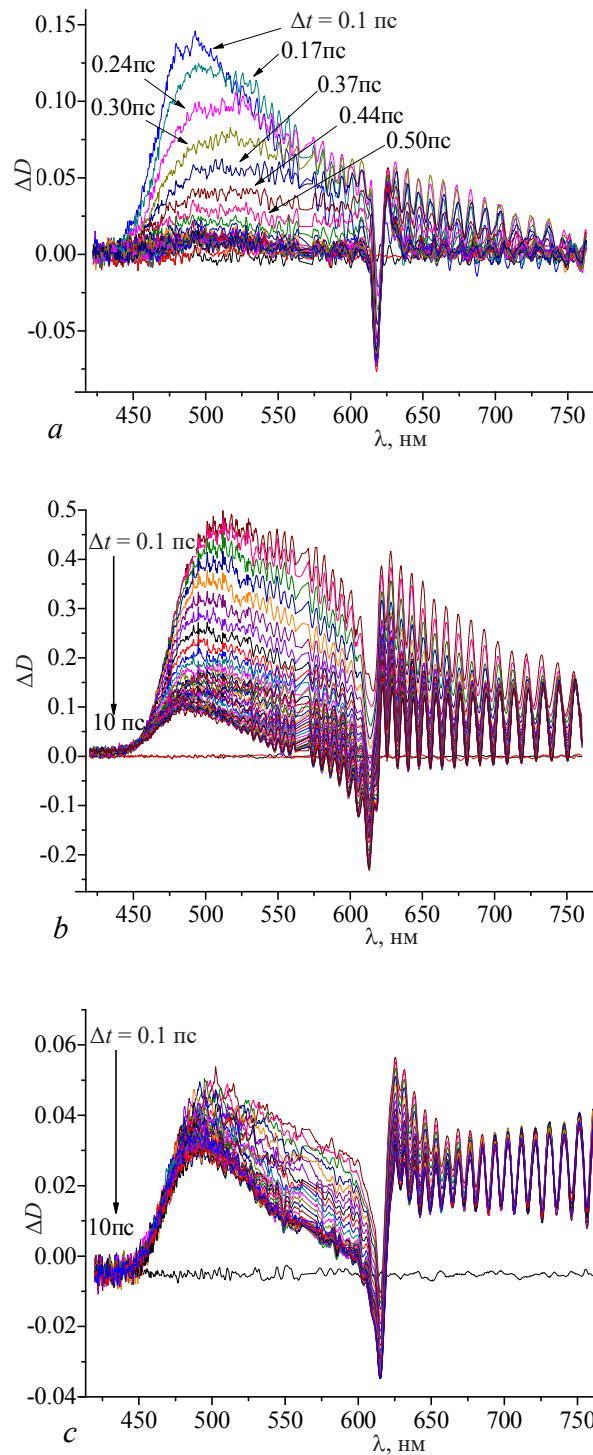


Рис. 2. Нестационарные спектры наведенного поглощения пленки GaSe при разных временных задержках зондирующего импульса относительно возбуждающего и при различных условиях возбуждения:  $\lambda_{\text{возб}} = 790 \text{ нм}$ ,  $I_{\text{возб}} = 8 \text{ ГВт/см}^2$  (a);  $\lambda_{\text{возб}} = 790 \text{ нм}$ ,  $I_{\text{возб}} = 50 \text{ ГВт/см}^2$  (b);  $\lambda_{\text{возб}} = 395 \text{ нм}$ ,  $I_{\text{возб}} = 5,6 \text{ ГВт/см}^2$  (c)

Fig. 2. Non-stationary spectra of induced absorption of the GaSe film at different time delays of the probing pulse relatively to the exciting one and under different excitation conditions:  $\lambda_{\text{exc}} = 790 \text{ нм}$ ,  $I_{\text{exc}} = 8 \text{ ГВт/см}^2$  (a);  $\lambda_{\text{exc}} = 790 \text{ нм}$ ,  $I_{\text{exc}} = 50 \text{ ГВт/см}^2$  (b);  $\lambda_{\text{exc}} = 395 \text{ нм}$ ,  $I_{\text{exc}} = 5.6 \text{ ГВт/см}^2$  (c)

Как видим, имеют место существенные отличия в форме и характере изменения спектров наведенного поглощения во времени в зависимости от условий возбуждения. При относительно низких интенсивностях возбуждения излучением 790 нм ( $8 \text{ ГВт/см}^2$ ), попадающего в область

прозрачности образца, наблюдается в основном широкополосный сигнал наведенного поглощения во всей спектральной области регистрации, существующий только в области временного перекрытия возбуждающих и зондирующих импульсов, а также узкая полоса просветления у края фундаментального поглощения со своей кинетикой релаксации. При высокой интенсивности ( $50 \text{ ГВт/см}^2$ ) возбуждения излучением данной длины волны дополнительно появляется широкополосное долгоживущее наведенное поглощение с выраженным максимумом в области 480 нм. При возбуждении образца излучением второй гармоники титан-сапфирового лазера (395 нм) также регистрируется долгоживущее широкополосное наведенное поглощение с максимумом в области 470–500 нм. Осциллирующий характер наведенного сигнала, особенно хорошо проявляющийся в длинноволновой области спектра, обусловлен сдвигом интерференционных полос в результате возбуждения материала образца фемтосекундным импульсом и соответствующего изменения показателя преломления.

Анализ полученных данных позволил сделать выводы о том, что в нестационарных спектрах регистрируется несколько типов наведенных изменений.

1. Быстро релаксирующее наведенное поглощение (максимум в спектральной области 500–600 нм) на «горячих» свободных носителях, образующихся непосредственно после межзонного перехода в результате двухквантового возбуждения образца глубоко в зону проводимости высокоинтенсивным излучением первой гармоники титан-сапфирового лазера, либо по одноквантовому механизму в случае использования второй гармоники.

2. Изменения, обусловленные двухквантовым двухчастотным поглощением (поглощение образцом зондирующего излучения в поле излучения накачки (790 нм) в результате двухквантовых двухчастотных переходов). Проявляются на эксперименте как интенсивное поглощение зондирующего излучения во всей спектральной области регистрации при перекрытии возбуждающих и зондирующих импульсов во времени. Зависимость амплитуды наведенных эффектов этого типа от интенсивности излучения накачки близка к линейной.

Кинетика изменения наведенной оптической плотности данного типа практически повторяет аппаратную функцию спектрометра. Такого типа процесс предполагает участие в переходе двух квантов (квант возбуждения + квант зондирующего излучения), и в этом случае в регистрируемых нестационарных спектрах должна фиксироваться точка отсечки, соответствующая длине волны зондирующего излучения, удовлетворяющая условию

$$h\nu_{\text{возб}} + h\nu_{\text{зонд}} = E_g.$$

Спектральная позиция данной точки должна перестраиваться в точном соответствии с перестройкой длины волны накачивающего излучения. Для GaSe точка отсечки в нашем эксперименте лежит в ИК-диапазоне, выходящем за пределы спектральной чувствительности фотоприемной матрицы спектрометра. В связи с данным обстоятельством был проведен эксперимент с использованием кристаллической пластинки сульфида цинка толщиной 1 мм, край фундаментального поглощения которого лежит в ультрафиолетовой области спектра. В этом случае точка отсечки должна лежать в области 550–580 нм и регистрироваться на эксперименте.

На рис. 3 приведены нестационарные спектры наведенного поглощения при временной задержке, соответствующей максимуму регистрируемого эффекта, для двух длин волн возбуждающего излучения (790 и 815 нм). Как видим, смещение точки отсечки соответствует спектральной перестройке возбуждающего излучения. Таким образом, данная нами интерпретация наблюдаемых эффектов в области перекрытия возбуждающего и зондирующего импульсов при возбуждении селенида галлия первой гармоникой титан-сапфирового лазера как двухквантовые двухчастотные переходы, сопровождающиеся поглощением зондирующего излучения в поле интенсивной накачки, находит дополнительное подтверждение.

3. Широкополосное долгоживущее наведенное поглощение практически во всей спектральной области регистрации (с выраженным максимумом в районе 480 нм), обусловленное термализованными ко дну зоны проводимости свободными носителями. Заселение этих состояний осуществляется в результате релаксации «горячих» электронов, возбуждаемых по двухфотонному

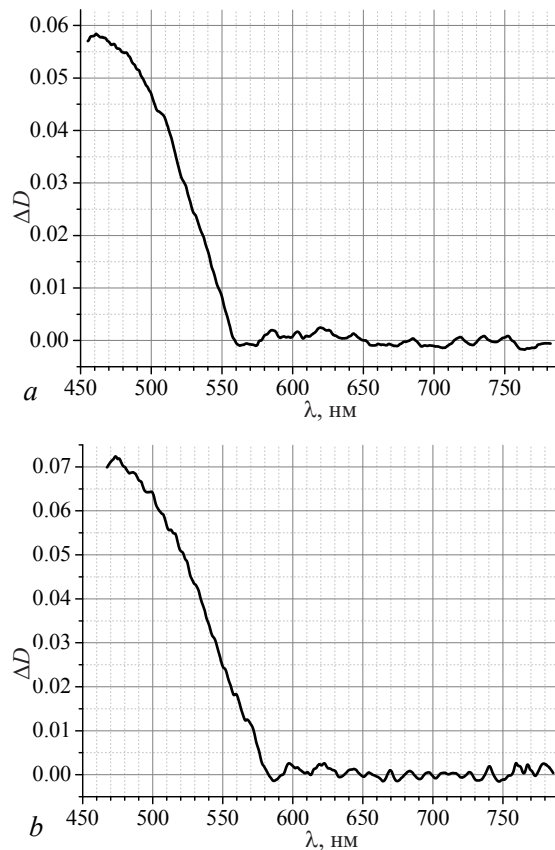


Рис. 3. Край двухквантового двухчастотного поглощения в области временного перекрытия возбуждающего и зондирующего импульсов пластинки сульфида цинка для двух длин волн возбуждающего излучения:  $\lambda_{\text{возб}} = 790$  нм (a);  $\lambda_{\text{возб}} = 815$  нм (b)

Fig. 3. The boundary of two-quantum two-frequency absorption in the region of the time overlap of the exciting and probing pulses for a zinc sulfide plate for two wavelengths of exciting radiation:  $\lambda_{\text{exc}} = 790$  нм (a);  $\lambda_{\text{exc}} = 815$  нм (b)

механизму [8] в случае использования первой гармоники титан-сапфирового лазера, при этом зависимость амплитуды эффекта от интенсивности возбуждения близка к квадратичной, либо по обычному однофотонному механизму в случае использования второй гармоники (395 нм).

4. Изменения, обусловленные заселением прикраевых (экситонных либо дефектных) состояний, что сопровождается появлением узких полос просветления и наведенного поглощения в спектральной области у края фундаментального поглощения. Заселение только прикраевых состояний осуществляется при относительно низких интенсивностях накачки первой гармоникой титан-сапфирового лазера за счет преимущественно резонансного возбуждения данных состояний в условиях двухквантового двухчастотного поглощения, причем обычные двухфотонные переходы при таких интенсивностях в наведенных спектрах практически не проявляются.

Все описанные процессы можно выделить в кинетических зависимостях наведенной оптической плотности в характерных спектральных диапазонах. На рис. 4, 5 приведена кинетика наведенной оптической плотности тонкой пленки селенида галлия в соответствующих спектральных интервалах для разных интенсивностей и длин волн возбуждающего излучения.

При возбуждении второй гармоникой титан-сапфирового лазера (395 нм) и первой гармоникой (790 нм) с высокой интенсивностью (50 ГВт/см<sup>2</sup>) в кинетике наведенной оптической плотности в области вблизи 510 нм отчетливо прослеживается процесс термализации «горячих» электронов, лежащий во временном диапазоне менее 1 пс (см. рис. 4, кривые 1 и 2). При существенно меньших интенсивностях первой гармоники (12 ГВт/см<sup>2</sup>) возбуждение горячих электронов практически не происходит (кривая 3). Реализуется только двухквантовое двухчастотное поглощение в области перекрытия импульсов возбуждения и зонда.

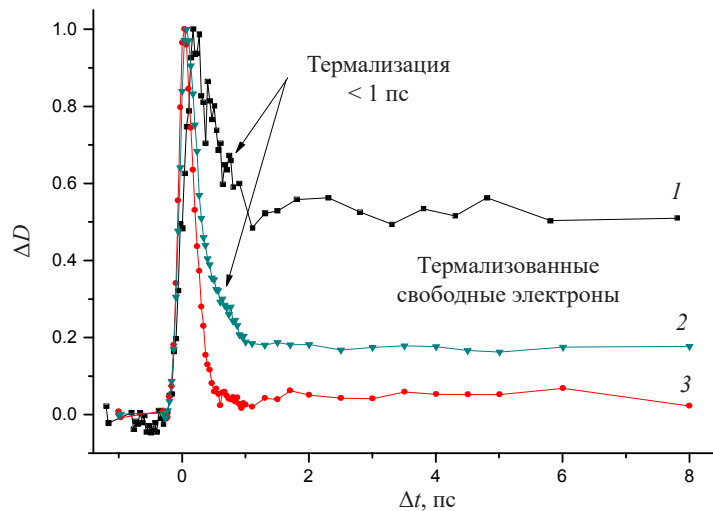


Рис. 4. Нормализованные кинетики наведенной оптической плотности пленки GaSe для  $\lambda_{\text{зонд}} = 510$  нм:  $\lambda_{\text{возб}} = 395$  нм,  $I_{\text{возб}} = 5,6$  ГВт/см<sup>2</sup> (1);  $\lambda_{\text{возб}} = 790$  нм,  $I_{\text{возб}} = 50$  ГВт/см<sup>2</sup> (2);  $\lambda_{\text{возб}} = 790$  нм,  $I_{\text{возб}} = 12$  ГВт/см<sup>2</sup> (3)

Fig. 4. Normalized kinetics of the induced optical density of GaSe films for  $\lambda_{\text{probe}} = 510$  nm:  $\lambda_{\text{exc}} = 395$  nm,  $I_{\text{exc}} = 5,6$  GW/cm<sup>2</sup> (1);  $\lambda_{\text{exc}} = 790$  nm,  $I_{\text{exc}} = 50$  GW/cm<sup>2</sup> (2);  $\lambda_{\text{exc}} = 790$  nm,  $I_{\text{exc}} = 12$  GW/cm<sup>2</sup> (3)

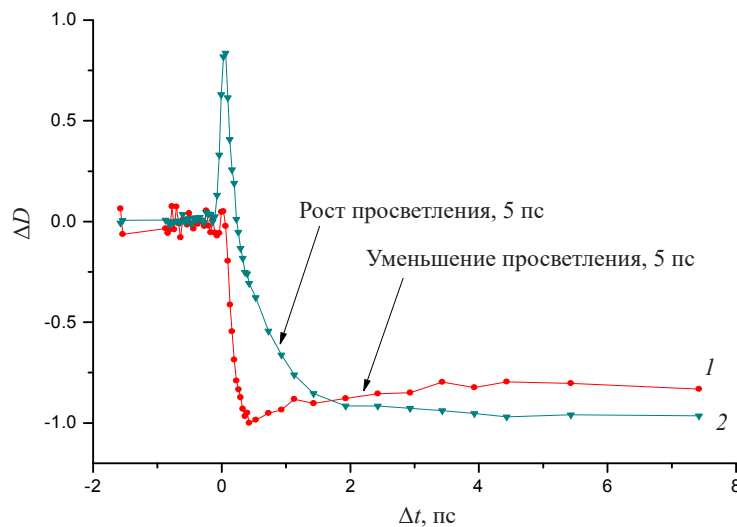


Рис. 5. Нормализованные на максимум просветления кинетики наведенной оптической плотности пленки GaSe для  $\lambda_{\text{зонд}} = 613$  нм:  $\lambda_{\text{возб}} = 790$  нм,  $I_{\text{возб}} = 12$  ГВт/см<sup>2</sup> (1);  $\lambda_{\text{возб}} = 790$  нм,  $I_{\text{возб}} = 50$  ГВт/см<sup>2</sup> (2)

Fig. 5. The kinetics of the induced optical density of GaSe films normalized to the maximum of bleaching for  $\lambda_{\text{probe}} = 613$  nm:  $\lambda_{\text{exc}} = 790$  nm,  $I_{\text{exc}} = 12$  GW/cm<sup>2</sup> (1);  $\lambda_{\text{exc}} = 790$  nm,  $I_{\text{exc}} = 50$  GW/cm<sup>2</sup> (2)

Как видно из рис. 5, в условиях длинноволнового возбуждения относительно низкой интенсивности (12 ГВт/см<sup>2</sup>) наблюдается преимущественно резонансное заселение прикраевых состояний в результате двухквантовых двухчастотных переходов, о чем свидетельствует некоторое падение амплитуды просветления в прикраевой зоне спектра поглощения, формируемой экситонами и ловушечными состояниями (кривая 1). Как мы полагаем, во временном диапазоне до 5 пс происходит установление динамического равновесия между двумя типами возбужденных частиц (термализованных свободных электронов и экситонов (ловушечных состояний)) с соответственным уменьшением заселенности последних. При обычном двухфотонном возбуждении электронов глубоко в зону проводимости и заселении данных состояний «сверху» в результате

термализации горячих электронов и последующего образования экситонов либо захвата термализованных электронов прикраевыми ловушками в кинетике просветления в этом же временном диапазоне наблюдается обратная картина, также обусловленная процессом установления динамического равновесия.

Итак, можно утверждать, что в случае относительно малых интенсивностей возбуждающего излучения (790 нм,  $\sim 10$  ГВт/см<sup>2</sup>) основной вклад в регистрируемые эффекты вносит двухквантовое двухчастотное возбуждение селенида галлия за счет эффективного поглощения излучения зонда в поле накачки. На эксперименте мы видим преимущественное заселение прикраевых ловушечных состояний при таких интенсивностях первой гармоники, когда еще не проявляются обычные двухфотонные переходы.

При больших интенсивностях возбуждения (790 нм, 50 ГВт/см<sup>2</sup>) основной вклад в формирование нестационарных спектров начинают вносить носители, генерируемые в результате классических двухфотонных переходов. Соответственно в спектрально-временной картине появляются особенности, обусловленные эффективной генерацией высокоэнергетических свободных носителей заряда, а именно: поглощение, связанное с «горячими» электронами и интенсивное поглощение на «холодных» свободных носителях, образующихся в результате термализации горячих электронов; имеется также вклад экситонов и ловушечных состояний. Конечно, определенный вклад в формирование общей спектрально-временной картины нестационарного поглощения, как и в вышерассмотренном случае, вносит двухквантовое двухчастотное поглощение зондирующего излучения в поле накачки.

**Заключение.** Таким образом, в настоящей работе с использованием методов фемтосекундной спектроскопии исследована динамика нестационарных спектров поглощения тонких пленок селенида галлия. Зарегистрировано несколько типов наведенных изменений, включая наведенное поглощение на свободных носителях («горячих» и термализованных), просветление и наведенное поглощение, обусловленное заселением прикраевых ловушечных (экситонных) состояний, а также быстрые изменения поглощения в области перекрытия возбуждающего и зондирующего импульсов, обусловленные двухквантовыми двухчастотными межзонными переходами. Исследована зависимость амплитуды наведенных эффектов от интенсивности возбуждающих импульсов. Проведено соотнесение регистрируемых нестационарных спектров с состоянием возбужденных носителей заряда. На основе анализа кинетических зависимостей наведенной оптической плотности дана интерпретация наблюдаемых эффектов как последовательности переходов свободных и связанных электронов в результате их взаимодействия с полем возбуждающего электромагнитного излучения и кристаллической решеткой.

### Список использованных источников

1. Генерация фемтосекундных импульсов в среднем ИК- и ТГц-диапазонах в кристаллах GaSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> / Д. М. Лубенко [и др.] // Изв. Рос. акад. наук. Сер. физ. – 2015. – Т. 79, № 2. – С. 300–304.
2. Ding, Y. J. Widely tunable monochromatic THz sources based on phase-matched difference-frequency generation in nonlinear-optical crystals: A novel approach / Y. J. Ding, W. Shi // Laser Phys. – 2006. – Vol. 16, № 4. – P. 562–570. <https://doi.org/10.1134/s1054660x06040050>
3. Wei Shi. A monochromatic and high-power terahertz source tunable in the ranges of 2.7–38.4 and 58.2–3540  $\mu\text{m}$  for variety of potential applications / Wei Shi, Y. J. Ding // App. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 84, № 10. – P. 1635–1637. <https://doi.org/10.1063/1.1649802>
4. Limiting pump intensity for sulfur-doped gallium selenide crystals / J. Guo [et al.] // Laser Phys. Lett. – 2014. – Vol. 11, № 5. – P. 055401 (6 p). <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/5/055401>
5. Impact of fs and ns pulses on indium and sulfur doped gallium selenide crystals // Z.-S. Feng [et al.] // AIP Advances – 2014. – Vol. 4, № 3. – P. 037104. <https://doi.org/10.1063/1.4868626>
6. Widely linear and non-phase-matched optical-to-terahertz conversion on GaSe:Te crystals / Wei-Chen Chu [et al.] // Opt. Lett. – 2012 – Vol. 37, № 5. – P. 945–947. <https://doi.org/10.1364/ol.37.000945>
7. Charge transfer process determines ultrafast excited state deactivation of thioflavin T in low-viscosity solvents / V. I. Stsiapura [et al.] // J. Phys. Chem. A. – 2010. – Vol. 114, № 32. – P. 8345–8350. <https://doi.org/10.1021/jp105186z>
8. Zotova, I. B. Spectral measurements of two-photon absorption coefficients for CdSe and GaSe crystals / I. B. Zotova, Y. J. Ding // Opt. Lett. – 2001 – Vol. 26, № 36. – P. 6654–6658. <https://doi.org/10.1364/ao.26.006654>



## References

1. Lubenko D. M., Losev V. F., Andreev Yu. M., Lansky G. V., Svetlichny V. A. Generation of femtosecond pulses in the mid – IR and THz ranges in GaSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> crystals. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2015, vol. 79, no. 2, pp. 238–241. <https://doi.org/10.3103/s1062873815020161>
2. Ding Y. J., Shi W. Widely tunable monochromatic THz sources based on phase-matched difference-frequency generation in nonlinear-optical crystals: A novel approach. *Laser Physics*, 2006, vol. 16, no. 4, pp. 562–570. <https://doi.org/10.1134/s1054660x06040050>
3. Wei Shi, Yujie J. Ding. A monochromatic and high-power terahertz source tunable in the ranges of 2.7–38.4 and 58.2–3540 μm for variety of potential applications. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 84, no. 10, pp. 1635–1637. <https://doi.org/10.1063/1.1649802>
4. Guo J., Li D.-J., Xie J.-J., Zhang L.-M., Feng Z.-S., Andreev Yu. M., Kokh K., Lanski G. V., Potekaev A. I., Shaiduko A. V., Svetlichnyi V. A. Limiting pump intensity for sulfur-doped gallium selenide crystals. *Laser Physics Letters*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 055401 (6 p). <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/5/055401>
5. Feng Z.-S., Kang Z. H., Li X.-M., Wang Zeng-Bin, Gao J.-Y., Andreev Yu. M., Atuchin V. V., Kokh K., Lanski G. V., Potekaev A. I., Shaiduko A. V., Svetlichnyi V. A. Impact of fs and ns pulses on indium and sulfur doped gallium selenide crystals. *AIP Advances*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 037104. <https://doi.org/10.1063/1.4868626>
6. Wei-Chen Chu, Shin An Ku, Harn Jiunn Wang, Chih Wei Luo, Andreev Yu. M., Lanski G. V., Kobayashi T. Widely linear and non-phase-matched optical-to-terahertz conversion on GaSe:Te crystals. *Optics Letters*, 2012, vol. 37, no. 5, pp. 945–947. <https://doi.org/10.1364/ol.37.000945>
7. Stsiapura V. I., Maskevich A. A., Tikhomirov S. A., Buganov O. V. Charge transfer process determines ultrafast excited state deactivation of thioflavin T in low-viscosity solvents. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2010, vol. 114, no. 32, pp. 8345–8350. <https://doi.org/10.1021/jp105186z>
8. Zotova I. B., Ding Y. J. Spectral measurements of two-photon absorption coefficients for CdSe and GaSe crystals. *Optics Letters*, 2001, vol. 40, no. 39, pp. 6654–6658. <https://doi.org/10.1364/ao.40.006654>

## Информация об авторе

**Тихомиров Сергей Александрович** – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Центра фотоники атомных и молекулярных структур, Институт физики им. Б. И. Степнова Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.tik@dragon.bas-net.by

## Information about the author

**Sergey A. Tikhomirov** – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Center of Photonics of Atoms and Molecules Structures, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (68-2, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.tik@dragon.bas-net.by