

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра  
компьютерной физики и метаматериалов  
на базе Саратовского филиала  
института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

**ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА  
НЕЛИНЕЙНОГО ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА  
В СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Автореферат квалификационной магистерской работы  
студента 2 курса, 251 группы,  
направления 03.04.02 «Физика» физического факультета  
Евсейко Семена Анатольевича

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Е.А. Романова

Зав. Кафедрой

профессор, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ В.М. Аникин

Саратов 2018

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Изучение нелинейных оптических процессов, протекающих в веществе, предоставляет новые возможности для решения различных имеющихся в области физики задач, а также открывает перспективы для постановки новых. В частности, нелинейные оптические свойства, которые проявляются при фотовозбуждении вещества сверхкороткими лазерными импульсами большой интенсивности, находят свое применение при создании волноводов. Модификации оптических свойств материала, которые происходят при воздействии лазерными импульсами, носят другой характер, нежели изменения, происходящие при использовании метода фотолитографии.

Одним из главных преимуществ метода «рисования» лазерными импульсами по сравнению с интегрально-оптической технологией фотолитографии является возможность создания трехмерных структур в объеме стекла. Нелинейным эффектом, позволяющим создать структурные изменения внутри вещества, является многофотонное поглощение. Применение трехмерной структуры позволяет значительно сократить площадь материала, используемого для рисования волновода. При использовании лазерных импульсов процесс создания волноводов упрощается и удешевляется, что позволяет сделать его потоковым.

В последнее время халькогенидные стёкла рассматриваются в качестве перспективного прозрачного материала для среднего инфракрасного диапазона длин волн (3 - 25 мкм). Халькогенидные стеклообразные полупроводники, отличаются рядом уникальных свойств: феноменальная радиационная стойкость, обратимое электрическое переключение и память, фотоиндуцированные структурные превращения, простота технологий [1].

**Цель** данной выпускной квалификационной работы состоит в том, чтобы охарактеризовать фотоиндуцированные процессы в халькогенидном стекле вблизи края полосы фундаментального поглощения для составов  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  и  $As_{40}Se_{45}S_{15}$  по результатам измерений нелинейного оптического отклика методом «накачка-зондирование».

В задачи настоящей работы входят:

1. Сравнительный анализ структурных и электронных свойств кристаллических и стеклообразных полупроводников;
2. Исследование характера нелинейного оптического отклика в образце стекол состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  и  $As_{40}Se_{45}S_{15}$  при различных энергиях импульса накачки, определение типа кинетики фотоиндуцированных носителей заряда и их сравнение;
3. Оценка времени перехода фотоиндуцированных носителей заряда в связанные состояния в запрещенной зоне;
4. Компьютерное моделирование кинетики фотоиндуцированных носителей заряда, оценка изменения показателя преломления в образце и сдвига фазы пробного импульса при установленной кинетике носителей заряда.

**Структура работы.** Данная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованной литературы.

Глава 1: Халькогенидные стекла, их электронные и оптические свойства.

Глава 2: Нелинейные оптические свойства некристаллических диэлектриков.

Глава 3: Модель Друде-Лоренца.

Глава 4: Метод «накачка-зондирование».

Глава 5: Временная динамика нелинейного оптического отклика.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи выпускной квалификационной магистерской работы.

**В Главе 1** представлено описание исследуемых образцов халькогенидных стекол. Здесь описываются их оптические свойства и области применения данных стекол.

Халькогенидные стекла отличаются от других оптических стекол тем, что имеют наибольшую нелинейную поляризацию третьего порядка [2], значения керровской постоянной на два-три порядка больше, чем в плавном кварце, а нелинейный отклик является очень быстрым (порядка фемтосекун-

ды). Благодаря своим уникальным свойствам, халькогенидные стекла могут найти широкое применение в устройствах ИК-оптики, сенсорных технологиях [1], в оптоэлектронике.

**В Главе 2** обсуждаются теоретические вопросы, связанные с нелинейными оптическими свойствами стеклообразных полупроводников: нелинейная поляризация в полупроводниках, а также нелинейные оптические явления, возникающие под действием оптических полей, такие как многофотонное поглощение, нелинейная модуляция фазы и фазовая кросс-модуляция оптического излучения [3].

**В Главе 3** описывается Модель Друде-Лоренца, которая была использована для описания перемещений свободных носителей заряда, наблюдаемых в полупроводниках.

**В Главе 4 в п.4.1** представлено описание трехимпульсного интерферометрического метода «накачка-зондирование» [4]. Данный метод используется в работе для исследования временной динамики нелинейного оптического отклика с фемтосекундным временным разрешением основан на измерении разности фаз двух пробных импульсов, которая пропорциональна изменению показателя преломления, наведенному в образце импульсом накачки [5]. Также в данной главе описывается экспериментальная установка, которая находится в Техническом Университете, в г.Палезо, во Франции (Рис.1). В качестве источника использовался титан-сапфировый лазер, генерирующий импульсы длительностью 50 фс с частотой повторения 20 Гц на длине волны 790 нм.

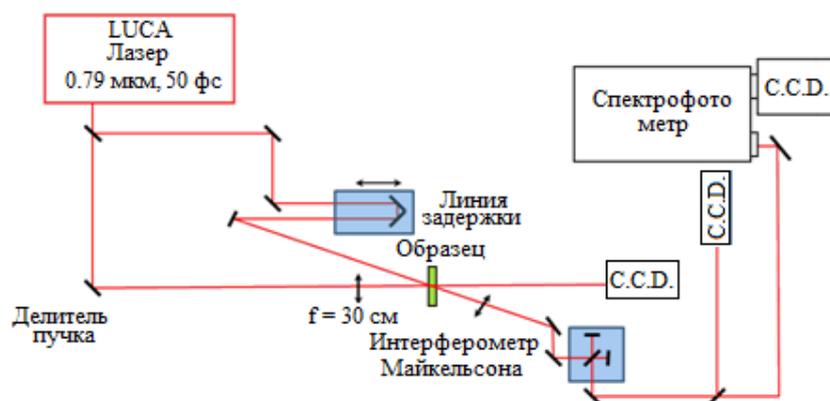


Рисунок 1. Оптическая схема для измерений трехимпульсным интерферометрическим методом «накачка-зондирование».

В Главе 5 описываются особенности временной динамики нелинейного оптического отклика в образцах халькогенидных стекол состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  и  $As_{40}Se_{45}S_{15}$ , для которых отношение энергии фотона к ширине запрещенной зоны находится вблизи края полосы фундаментального поглощения (область (хвост) Урбаха) (Рисунок 2), а также проводится обработка результатов измерений оптического нелинейного отклика в данных образцах (Рисунок 3).

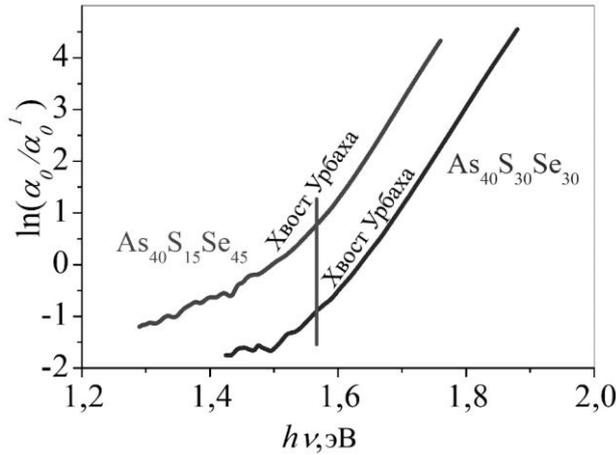


Рисунок 2. Позиции фотона накачки относительно области Урбаха для стекол составов  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  и  $As_{40}Se_{45}S_{15}$ .

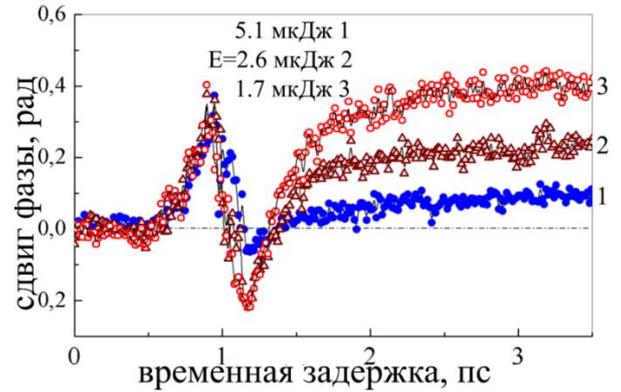


Рисунок 3. Усредненный по поперечной координате сдвиг фазы пробного импульса как функция временной задержки относительно импульса накачки для состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  при различной энергии  $E$  импульса накачки.

В п.5.1 рассматривается система уравнений, соответствующая кинетике носителей заряда

$$dn_e/dt = \sigma_2 I^2 / N_c + \sigma_x n_{te} I - n_e / \tau_r, \quad (1 \text{ а})$$

$$dn_{te}/dt = \sigma_1 I / N_c - \sigma_x n_{te} I + n_e / \tau_r. \quad (1 \text{ б})$$

В п.5.1.1. показан расчет сдвига фазы пробного импульса в образце состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  (Рисунок 4).

В п.5.1.2. показана кинетика носителей заряда при разных значениях времени рекомбинации для образца состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  (Рисунок 5).

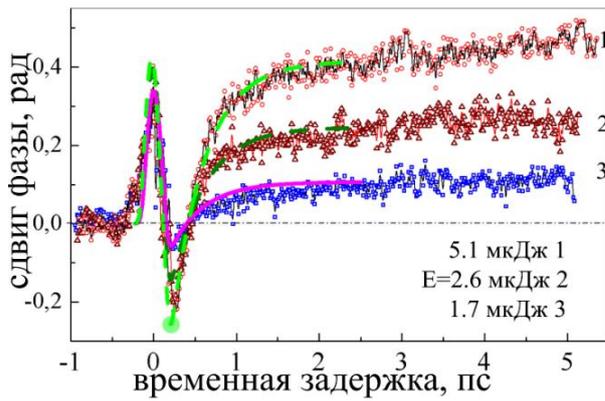


Рисунок 4. Усредненный по поперечной координате сдвиг фазы пробного импульса как функция временной задержки относительно импульса накачки при различной энергии импульса накачки в образце  $As_{40}Se_{30}S_{30}$

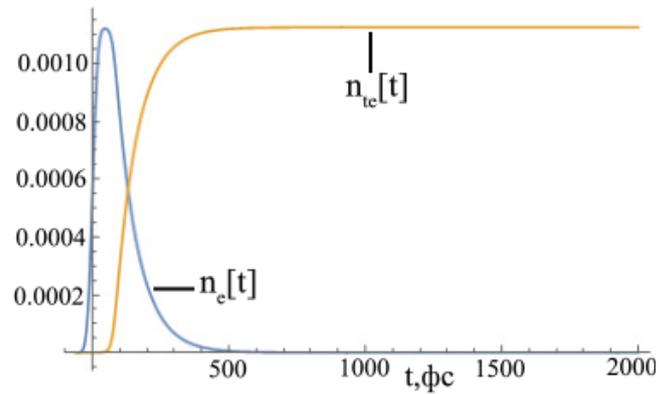


Рисунок 5. Плотность свободных  $n_e$  и связанных  $n_{te}$  электронов при времени рекомбинации  $\tau_r = 80 \text{ фс}$ .

**В п.5.1.3.** показана кинетика носителей заряда при разных значениях сечения поглощения для образца состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  (Рисунок 6).

**В 5.1.4.** показан расчет сдвига фазы пробного импульса для образца состава  $As_{40}Se_{45}S_{15}$  (Рисунок 7).

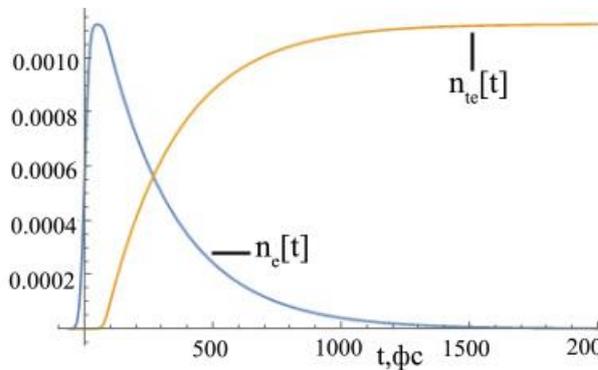


Рисунок 6. Плотность свободных  $n_e$  и связанных  $n_{te}$  электронов при  $\sigma_x = 0.001 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/(\text{фс} \cdot \text{Вт})$

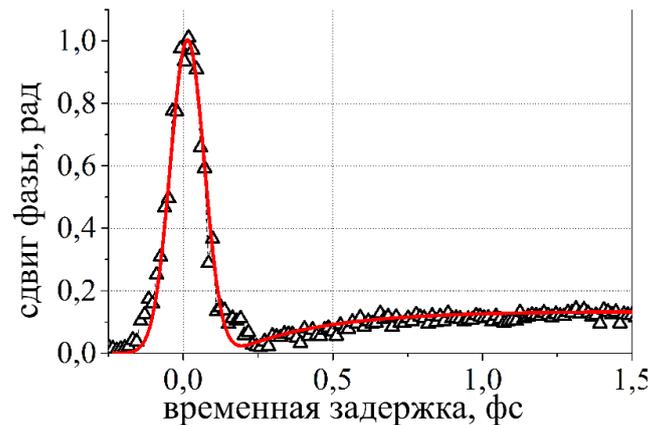


Рисунок 7. Усредненный по поперечной координате сдвиг фазы пробного импульса как функция временной задержки относительно импульса накачки при энергии импульса накачки  $80 \text{ ГВт/см}^2$  в образце  $As_{40}Se_{45}S_{15}$ .

**В п.5.1.5.** показаны результаты расчета кинетики носителей заряда при разных значениях времени рекомбинации для образца состава  $As_{40}Se_{45}S_{15}$  (Рисунок 8). **В п.5.2.** произведен расчет фотоиндуцированного изменения показателя преломления в образцах стекла состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  (Рисунок 9) и  $As_{40}Se_{45}S_{15}$  (Рисунок 10).

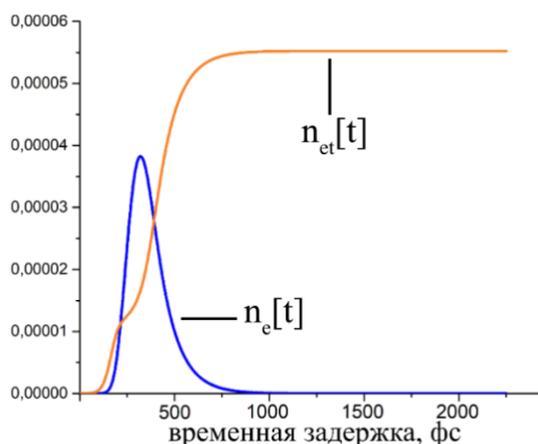


Рисунок 8. Показана нормированная плотность носителей заряда на критическую плотность плазмы в зависимости от временной задержки пробного импульса от импульса накачки. Плотность электронов проводимости - синяя кривая, плотность экситонов -оранжевая кривая. Время рекомбинации  $\tau_r = 100$  фс

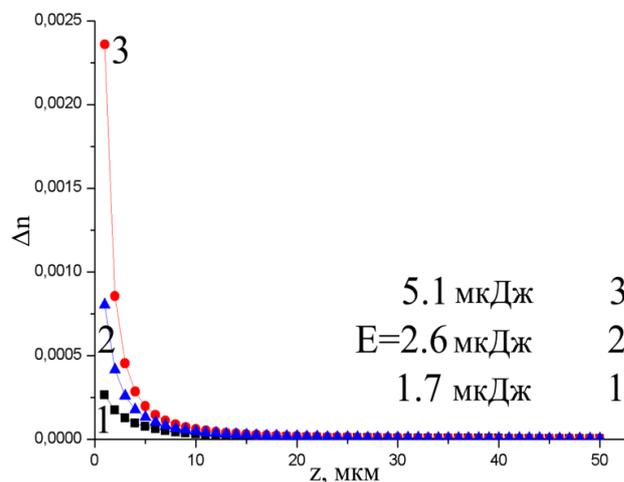


Рисунок 9. Фотоиндуцированное изменение показателя преломления в образце  $As_{40}Se_{30}S_{30}$ . Видно, что показатель преломления выше всего в начале образца. Пучок сфокусирован на поверхности образца. Из-за этого все модификации проходят на поверхности образца.

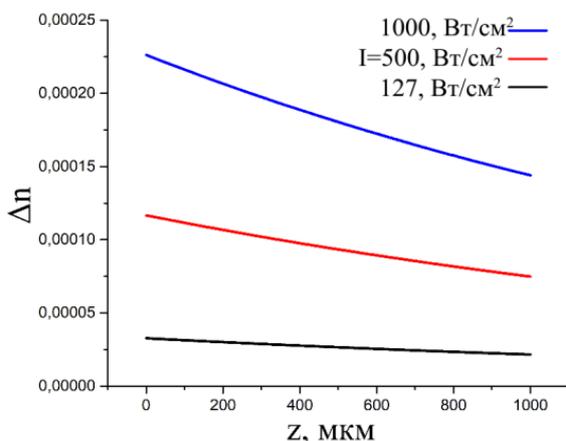


Рисунок 10. Фотоиндуцированное изменение показателя преломления в образце  $As_{40}Se_{45}S_{15}$ . Модификации происходят вдоль всего образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически и экспериментально исследован нелинейно-оптический отклик в образцах халькогенидных стекол составов  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  и  $As_{40}Se_{45}S_{15}$ . Измерены сдвиг фазы и поглощательная способность для пробного импульса в зависимости от задержки по времени относительно импульса накачки. Построена численная модель кинетики носителей заряда. Показано, что результаты расчета сдвига фазы пробного импульса хорошо согласуются с результатами измерений, что подтверждает правильность выбора данной теоретической модели.

Поскольку в полученных результатах не было обнаружено уменьшения плотности связанных состояний со временем, постоянный положительный сдвиг фазы означает, что в облученной области увеличился показатель преломления, причем, это изменение является постоянным. Это позволяет создавать в образце стекла оптические волноводы и более сложные структуры.

В компьютерной модели рассматривался случай падения на образец плоской волны, при котором наибольшие структурные изменения происходили вблизи передней поверхности образца, что соответствует условиям эксперимента, т.к. для фокусировки лазерного пучка использовалась длиннофокусная линза. При использовании остро сфокусированного пучка модификации можно делать в объеме образца.

Таким образом, использование данной компьютерной модели позволяет эффективно исследовать характер фотоиндуцированных процессов в образцах халькогенидных стекол и управлять процессами лазерной записи волноводов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Толмачев И.Д. Стронский А.В. Применение халькогенидных стеклообразных полупроводников в сенсорах и сенсорных системах (обзор) // ОПТ. – 2009. – Вып. 44.
2. Zakeru A., Elliot S.R. Optical nonlinearities in chalcogenide glasses and their applications. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 2007.
3. Сидоров Н.К., Введение в волновую нелинейную оптику. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1991.

4. Guizard S., Mao S.S., Quere F., Mao X., Russo R.E., Petite G., Martin P. Dynamics of femtosecond laser interaction with dielectrics // *Applied Physics A*. 2004. V. 79. P. 1695-1709.
5. Martin P., Guizard S., Daguzan Ph., Petite G., D'Oliveria P., and Perdrix M., Subpicosecond study of carrier trapping dynamics in wide-band-gap crystals // *Phys. Rev. B* 55, 5799 – Published 1 March 1997.