

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Саратовский национальный исследовательский государственный универси-  
тет имени Н.Г. Чернышевского»

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

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НАГРЕВЕ  
ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Автореферат квалификационной магистерской работы

студента 2 курса 251 группы  
направления 03.04.02 «Физика» физического факультета  
Рамазанова Тимура Гаджиабдуллаховича

Научный руководитель

д. ф.-м. н., профессор

Е.А.Романова

---

Зав. кафедрой

д. ф.-м. н., профессор

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].

**Целью** данной выпускной квалификационной работы является исследование в компьютерных моделях особенностей термодинамических процессов в оптическом стекле при воздействии лазерных импульсов большой интенсивности.

### **Задачи работы:**

1. Изучить теплофизические свойства оптических стекол системы As-S-Se (халькогенидные стекла)

2. Ознакомиться с результатами измерений нелинейного оптического отклика в образцах халькогенидных стекол трехимпульсным методом «накачка-зондирование» и оценить температуру стекла в области воздействия импульса накачки.
3. Провести расчет пространственного распределения температуры в образце стекла при воздействии сфокусированного лазерного пучка для заданной пороговой интенсивности двухфотонного поглощения.
4. Провести компьютерное моделирование остывания стекла после воздействия лазерного импульса путем численного решения уравнения термодинамики.
5. Исследовать особенности кумулятивного режима при воздействии на стекло последовательности лазерных импульсов с заданной частотой повторения.

**Структура работы.** Работа состоит из введения, 4 глав, выводов, и списка использованной литературы.

Глава 1: Фотоиндуцированные эффекты в проводниках.

Глава 2: Нелинейный оптический отклик в образце халькогенидного стекла при облучении фемтосекундным лазерным импульсом.

Глава 3: Исследование нагрева халькогенидного стекла сфокусированным лазерным пучком.

Глава 4: Компьютерное моделирование термодинамики стекла после нагрева лазерным импульсом

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В Главе 1** описываются фотоиндуцированные эффекты в проводниках, в частности эффект нелинейного поглощения. Поглощение приводит к уменьшению интенсивности оптического излучения, проходящего через материальную среду, за счёт процессов его взаимодействия со средой. При этом один или несколько фотонов падающего излучения поглощаются частицами среды, так что энергия излучения передается среде. В терминах квантовой теории электроны в поглощающих атомах, ионах, молекулах или твёрдых телах переходят с более низких уровней энергии на более высокие.

Двухфотонное поглощение впервые наблюдалось при облучении красным светом рубинового лазера ( $\lambda=694.3\text{нм}$ ) кристалла флуорита, активированного ионами европия. Синяя флуоресценция кристалла ( $\lambda=425\text{нм}$ ) возникла в результате поглощения двух фотонов.

**В Главе 2** представлено описание исследуемых образцов халькогенидных стекол. Здесь описываются их оптические свойства и области применения данных стекол, также представлено описание трехимпульсного интерферометрического метода «накачка-зондирование» [2]. **В п. 2.2** Проводится обработка результатов измерений оптического нелинейного отклика в образцах  $\text{As}_{40}\text{Se}_{30}\text{S}_{30}$  и  $\text{As}_{40}\text{Se}_{45}\text{S}_{15}$ . **В п. 2.3** производились расчеты изменения температуры в образцах составов  $\text{As}_{40}\text{Se}_{30}\text{S}_{30}$  и  $\text{As}_{40}\text{Se}_{45}\text{S}_{15}$  при энергиях  $E$  импульса накачки, которые использовались при измерениях в п.2.2 которые показаны на рисунках 3 и 4.

Халькогенидные стекла отличаются от других оптических стекол тем, что имеют наибольшую нелинейную поляризацию третьего порядка, значения керровской постоянной на два-три порядка больше, чем в плавном кварце, а нелинейный отклик является очень быстрым (порядка фемтосекунды). Благодаря своим уникальным свойствам, халькогенидные стекла могут найти широкое применение в устройствах ИК-оптики, сенсорных технологиях, в оптоэлектронике и т.д.

Метод «накачка-зондирование» 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 [2]. Также в данной главе описывается экспериментальная установка, которая находится в Техническом Университете, в г. Палезо, во Франции (Рисунок 1). В качестве источника использовался титан-сапфировый лазер, генерирующий импульсы длительностью 50 фс с частотой повторения 20 Гц на длине волны 790 нм.

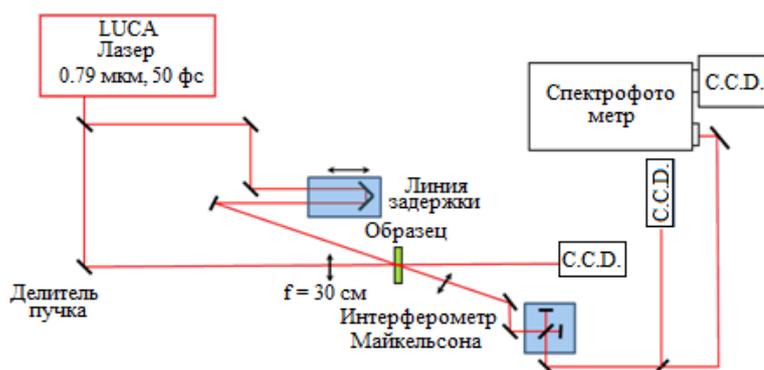


Рисунок 1. Оптическая схема для измерений трехимпульсным интерферометрическим методом «накачка-зондирование».

На Рисунке 2 показана измеренная временная зависимость сдвига фазы пробного импульса при различной энергии импульса накачки в образцах стекол составов  $As_{40}Se_{30}S_{30}$ .

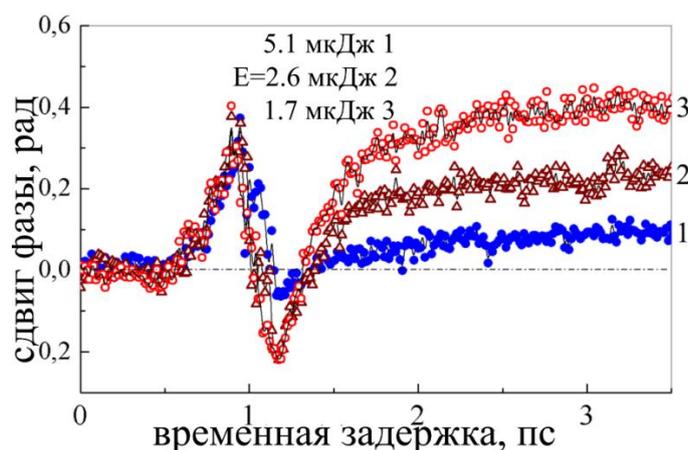
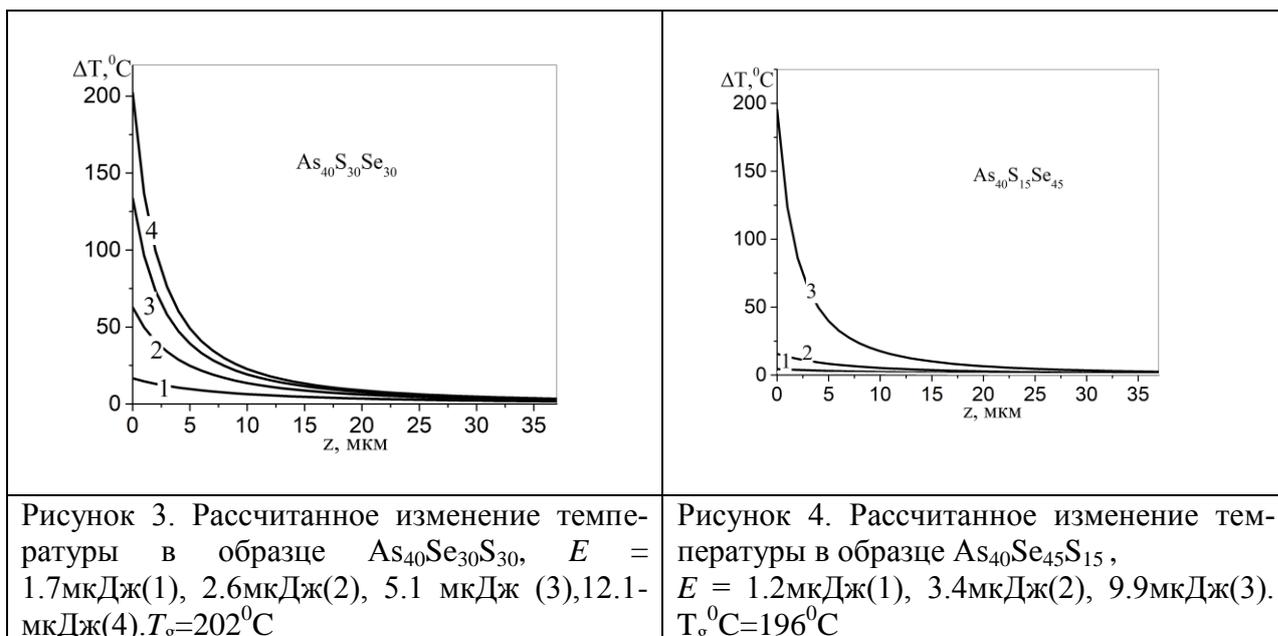


Рисунок 2. Усредненный по поперечной координате сдвиг фазы пробного импульса как функция временной задержки относительно импульса накачки для состава  $As_{40}Se_{30}S_{30}$  при различной энергии  $E$  импульса накачки

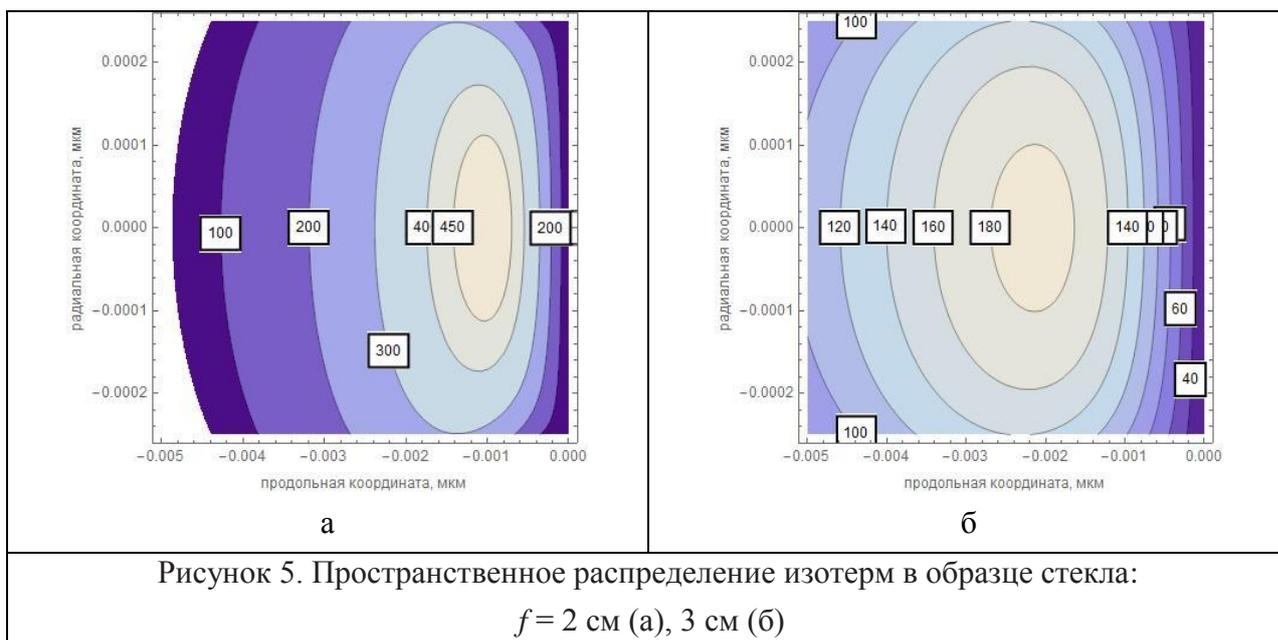
В п.2.3 определялось изменение температуры в образце стекла сразу после прохождения лазерного импульса. На рисунках 3 и 4 видно, что в результате двухфотонного поглощения импульса накачки нагревается только узкий приповерхностный слой образца толщиной не более 30 мкм.



**В Главе 3. п. 3.1** осуществлялся расчет пространственного распределения температуры в образце стекла в области фокусировки лазерного пучка с использованием приближенного метода, описанного в работе [1].

Вначале был проведен расчет пространственного распределения поглощенной энергии с учетом пространственного профиля лазерного пучка.

Двумерные распределения температуры в области фокусировки лазерного пучка с пиковой длиной волны 0.8 мкм показаны на рисунке 5. Процесс нагрева стекла зависит от условия фокусировки лазерного пучка. Используя линзы с разным фокусным расстоянием  $f$ , можно управлять термодинамическими процессами в образце.



В главе 4 осуществляется компьютерное моделирование термодинамики стекла после нагрева лазерным импульсом путем решения уравнения теплопроводности (п.4.1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho C} \nabla^2 T + \frac{W(x, y, z, t)}{\rho C}, \quad (1)$$

Приведем это уравнение к удобному для вычислений виду путем введения новой функции  $T_r(t, r) \rightarrow r \cdot T(t, r)$ :

$$\frac{dT_r(t, r)}{dt} - df \cdot \frac{d^2 T_r(t, r)}{dr^2} = 0 \quad (2)$$

Для этого уравнения сформулируем задачу Коши: найти функцию  $T_r(t, r)$  путем решения уравнения (2) с начальными и граничными условиями:

$$T_r(0, r) = T_0 \cdot r \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{\omega^2}\right) \quad (3)$$

В п. 4.2 представлены результаты компьютерного моделирования термодинамики стекла при поглощении излучения одного лазерного импульса.

На рисунке 6 показано изменение пространственного распределения температуры с течением времени, которое отсчитывалось от момента нагрева стекла лазерным импульсом. Видно, что со временем происходит остывание нагретой области, причем в центре распределения ( $r=0$ ) при разной начальной температуре за одинаковые промежутки времени температура уменьшается в одинаковое число раз.

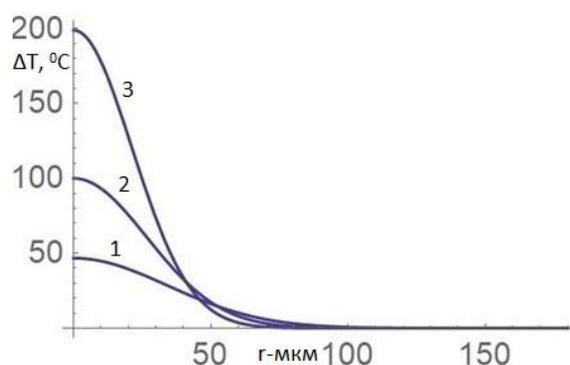


Рисунок 6. Пространственное распределение температуры в моменты времени:  $t = 460$ сек (1),  $360$ сек (2),  $260$ сек (3);  $T_i = 200$  °C

В п. 4.3 Произведен расчет термодинамики стекла в кумулятивном режиме. В расчетах рассматривалось воздействие 10 лазерных импульсов с различной частотой повторения для халькогенидного стекла состава  $As_2S_3$ :  $n_{imp}=10$  (количество импульсов);  $t_{rep}=0.1, 0.5, 1.0$  (фс)(время повторения импульсов).

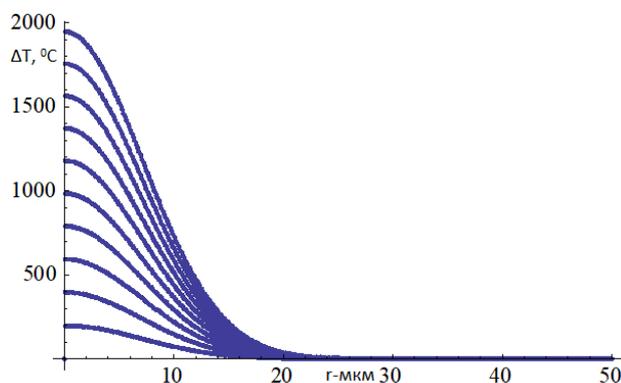


Рисунок 7. Пространственное распределение температуры в области нагрева при кумулятивном режиме.  $t_{rep}=0.1$  фс ;  $T_i=200$  °C

Видно, что меняя частоту повторения импульсов, можно управлять термодинамическими процессами в образце стекла. При большей частоте повторения импульсов (меньшем временном интервале между импульсами) можно нагреть стекло до значительно большей температуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе проведено исследование термодинамических процессов в образцах халькогенидного стекла, облученных лазерными импульсами большой интенсивности. Путем сравнения результатов измерений наведенного показателя преломления методом «накачка-зондирование» с результатами расчетов температуры показано, что фотоиндуцированное изменение показателя преломления в стекле не связано с плавлением стекла. Показано, что при слабой фокусировке лазерного пучка показатель преломления меняется в узком приповерхностном слое стекла, что связано с нелинейным характером поглощения излучения лазерного импульса. В работе показано, что при сильной фокусировке лазерного пучка положение максимума распределения температуры и вид изотерм зависят от фо-

кусного расстояния линзы. Исследования термодинамики стекла в численной модели, основанной на решении уравнении теплопроводности, показали, что при кумулятивном нагреве стекла несколькими лазерными импульсами, варьируя частоту повторения импульсов, можно менять режим нагрева и остывания стекла.

#### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. M. Shane Eaton, Haibin Zhang, R. Peter Herman Heat accumulation effects in femto second laser written wave guides with variable repetition rate. 13 June 2005 / Vol. 13, No. 12 / Optics Express 4708.
2. 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.