

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 СФ ИРЭ им.В.А. Котельникова РАН

**Температурные режимы при нагреве полупроводникового  
стекла лазерными импульсами**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студентки 4 курса 431 группы  
направления 03.03.02 «Физика» физического факультета

**Лахитовой Екатерины Михайловны**

Научный руководитель  
Профессор, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Е.А. Романова  
подпись, дата

Зав. кафедрой  
Профессор, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ В.М. Аникин  
подпись, дата

Саратов 2020

# ВВЕДЕНИЕ

## Актуальность работы

Поглощение энергии лазерного пучка большой интенсивности в твёрдом веществе используется в различных областях: от фотоники до материаловедения и от биологии до медицины.

При воздействии лазерного излучения на вещество происходит его нагрев и изменение оптических свойств. От величины поглощательной способности вещества непосредственно зависит количество поглощенного и выделенного тепла и динамика его пространственного распределения. При облучении фемтосекундными лазерными импульсами большой интенсивности возможно нелинейное поглощение, что обеспечивает локальную модификацию материала.

Облучение образцов стекол импульсами достаточно большой интенсивности приводит к локальной модификации оптических свойств стекол, и в частности, показателя преломления.

В последнее время методом фемтосекундных лазерных модификаций были изготовлены разветвители, волноводные решетки, системы параллельных волноводов, волноводные лазеры и другие стандартные элементы волоконных и интегральных оптических схем. Было установлено, что при использовании одного и того же режима облучения в различных стеклах получают волноводы с различными характеристиками. В этих применениях, для того, чтобы управлять химической реакцией и структурными модификациями необходимо, чтобы поглотилась значительная часть энергии сверхкороткого лазерного импульса. Процесс поглощения нужно исследовать при рассмотрении распространения светового пучка и расчёте пространственного распределения поглощённой энергии.

Использование полупроводниковых стекол обусловлено их уникальными оптическими и электрофизическими свойствами. К полупроводниковым стеклам относятся халькогенидные стекла.

Халькогенидное стекло — это бескислородное стекло, содержащее атомы халькогенов (серы, селена, теллура) (S, Se, Te). Стеклообразование возможно при сочетании халькогенов с различными элементами, такими как As, Ge, Si, Pb, Tl, P, Sb, Bi (мышьяк, германий, кремний, свинец, таллий, фосфор, сурьма, висмут).

Физические свойства халькогенидных стёкол (большой показатель преломления, низкая энергия фононов, высокая нелинейность) делают их идеальной средой для использования в устройствах интегральной и волоконной оптики, фотонных интегральных схемах и активных устройствах.

При изменении температуры некоторые халькогенидные стёкла могут изменять фазовое состояние от аморфного до кристаллического.

Высокая фоточувствительность халькогенидных стекол используется для создания волноводов на поверхности образцов стекла. При облучении стекла сверхкороткими лазерными импульсами становятся возможными объёмные модификации, так как в этом случае при взаимодействии излучения со стеклом происходят нелинейные оптические явления.

**Цель** данной выпускной квалификационной работы состоит в том, чтобы исследовать режимы нагрева образцов халькогенидного стекла лазерными импульсами большой интенсивности и установить зависимость размеров модифицированных областей от условий фокусировки нестационарного лазерного пучка в образце.

### **Задачи работы:**

1. Изучить оптические и теплофизические свойства полупроводниковых стекол системы As-S-Se (халькогенидные стекла).
2. Ознакомиться с теоретическими методами описания распространения нестационарного лазерного пучка в среде с нелинейным поглощением.
3. Рассчитать полную энергию, поглощенную в образце, в зависимости от условий фокусировки нестационарного лазерного пучка.

4. Провести расчет пространственного распределения температуры в образце стекла при воздействии сфокусированного лазерного пучка при заданной пороговой интенсивности двухфотонного поглощения.
5. Определить размеры областей, нагретых выше температуры плавления образцов стекла разного состава.

### **Структура работы:**

Данная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, и списка использованной литературы.

Глава 1: Халькогенидные стёкла, их оптические и теплофизические свойства.

Глава 2: Перенос тепловой энергии в твёрдых телах.

Глава 3: Нагрев стекла сфокусированным лазерным пучком.

Глава 4: Компьютерное моделирование нагрева халькогенидного стекла лазерными импульсами.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

В **Главе 1** описываются общие характеристики химических элементов «халькогенов», строение атомной решетки, электронные, оптические, теплофизические свойства и фотоиндуцированные изменения в халькогенидных стёклах. В **п.1.5** представлена таблица с разными составами и их данными, по которым проводится дальнейший расчет.

В Главе 2 представлено описание переноса тепловой энергии в твёрдых телах, который определяется процессом теплопроводности. В твердых телах перенос тепловой энергии осуществляется путем упругих волн (фононов). Передача теплоты в веществе сопровождается изменением температуры (температурного поля  $T(r,t)$ ), как в пространстве, так и во времени. Такое температурное поле называется *нестационарным*. Оно возникает при обработке материала импульсным лазерным излучением.

В теле с температурой  $T(r,t)$  можно выделить поверхность, во всех точках которой в любой, но один и тот же момент времени  $t_1$ , температура одинакова (рисунок 1). Такая поверхность называется *изотермической*.

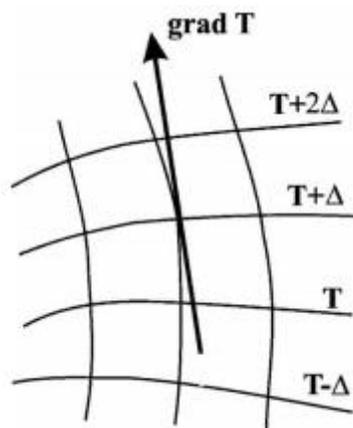


Рисунок 1. Температурный градиент и изотермические поверхности.

Температура в теле изменяется только в направлениях, пересекающих изотермические поверхности. Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры. *Градиент температуры* есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры.

Для передачи теплоты теплопроводностью необходимо, чтобы существовал *градиент температуры*, который определяет величину теплового потока. В этом смысле температурный градиент является основным физическим параметром, определяющим условие возникновения процесса передачи теплоты.

В Главе 3 описывается нагрев стекла сфокусированным лазерным пучком. В п.3.1 подробно рассматривается аналитическая модель распространения нестационарного лазерного пучка в среде с нелинейным поглощением.

Модель взаимодействия лазерного излучения и вещества позволяет оценить поглощённую энергию при фокусировке нестационарного лазерного пучка и построить пространственное распределение поглощённой энергии. Интенсивность пучка при попадании в среду с нелинейным поглощением уменьшается до некоторого порогового значения интенсивности  $I_h$ .

Распределение интенсивности в поперечном сечении такого лазерного пучка аппроксимируется гауссовой функцией (рисунок 2).

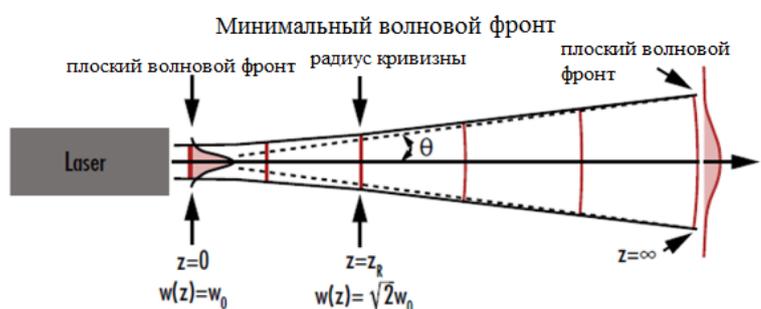


Рисунок 2. Световой пучок на выходе лазера

Нелинейное поглощение нестационарного гауссового пучка аппроксимируем ступенчатой функцией с порогом по интенсивности  $I_h$  (рисунок 3).

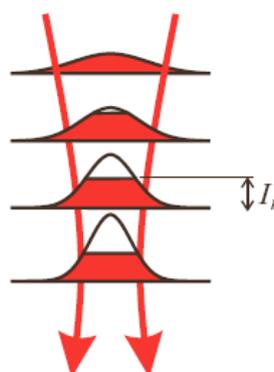


Рисунок 3. Распределение интенсивности лазерного пучка в перетяжке после поглощения энергии выше порогового значения интенсивности  $I_h$ .

Расчёт поглощённой энергии за время прохождения импульса:

$$E_A = E_0 \left\{ \operatorname{erf} \left( \sqrt{\ln \frac{I_0}{I_h}} \right) - \frac{2I_h}{\sqrt{\pi}I_0} \left( 1 + \frac{2}{3} \ln \frac{I_0}{I_h} \right) \sqrt{\ln \frac{I_0}{I_h}} \right\} \quad (1)$$

Полная поглощенная энергия может быть рассчитана в предположении, что всё поглощение происходит в области перетяжки пучка, по формуле:

$$N(z, r) = \frac{-4I_h \tau_0 z}{z_0^2 + z^2} \sqrt{\ln \left( \frac{I_0}{I_h \left( 1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right)} \right) - \frac{r^2}{\omega_0^2 \left( 1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right)}} \quad (2)$$

Если лазерный импульс является фемтосекундным, его можно рассматривать как дельта-функцию во времени. Тогда для азимутально-симметричной задачи можно рассчитать распределение температуры в плоскости  $(r, z)$  образца стекла по формуле:

$$T(z, r) = \frac{N(z, r)}{\rho C} + T_0. \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  - плотность стекла,  $C$  - удельная теплоемкость,  $T_0$  - начальная температура стекла.

В пункте 3.2- описывается фокусировка лазерного пучка в образце стекла. Пусть пучок перед попаданием в образец стекла проходит через тонкую линзу. Считаем, что падающий на линзу пучок является квазиплоским, т.е. его радиус кривизны  $R_0 \rightarrow \infty$ . Тогда радиус сфокусированного пучка на расстоянии  $z$  от линзы вычисляется следующим образом:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{\left( -f^2 n^2 + 2fnz - z^2 - \frac{f^2 \lambda^2 z^2}{\pi^2 w_0^4} \right)}{f^2 n^2}} \quad (4)$$

где  $\omega_0$  - радиус пучка падающего на линзу. Значение радиуса пучка в перетяжке определяется следующим образом

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\frac{f^2}{z_0^2}}{1 + \frac{f^2}{z_0^2}}} \quad (5)$$

В Главе 4 представлено компьютерное моделирование нагрева халькогенидного стекла лазерными импульсами. В п.4.1 представлены результаты расчета зависимости доли поглощенной (по формуле (1)) в образце стекла энергии от фокусного расстояния линзы, фокусирующей лазерный пучок на длине волны  $\lambda=0.8$  мкм с радиусом 2.5 мм, при пороговом значении интенсивности двухфотонного поглощения  $I_h = 5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (рисунок 4).

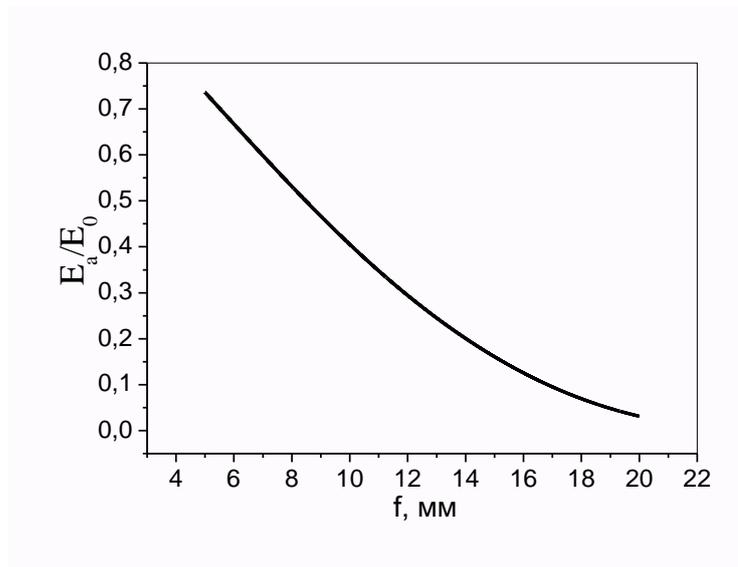


Рисунок 4. Доля поглощенной в образце стекла энергии импульса в зависимости от фокусного расстояния линзы.

В п.4.2. осуществлялся расчет двумерного распределения температуры при разных радиусах  $\omega_0$  сфокусированного светового пучка. в плоскости  $(r,z)$  в образцах халькогенидного стекла по формулам (2), (3) в области фокусировки нестационарного лазерного пучка с пиковой длиной волны  $\lambda=0.8$  мкм, длительностью импульса  $\tau_0 = 20$  нс и энергией  $E_0 = 50$  мДж и пороговой интенсивностью поглощения  $I_h = 5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Расчеты были проведены для образцов стекла составов  $As_{40}S_{60}$ ,  $As_{40}S_{30}Se_{30}$  и  $As_{40}Se_{60}$ .

Структурные модификации, в результате которых меняются оптические свойства стекла, происходят внутри объемной области, температура которой

превышает температуру плавления стекла  $T_g$ . Были построены изотермы  $T_g$  для каждого образца при различных значениях  $\omega_0$ . Внутри области, ограниченной этой изотермой, температура больше  $T_g$ , т.е. стекло находится в расплавленном (жидком) состоянии.

В п.4.3. проводилось определение размеров модифицированных областей по изотермам.

Оценим продольный  $\Delta z$  и поперечный  $\Delta r$  размеры областей, нагретых выше  $T_g$ , по графикам полученных в пункте 4.2., как показано на рисунке 5.

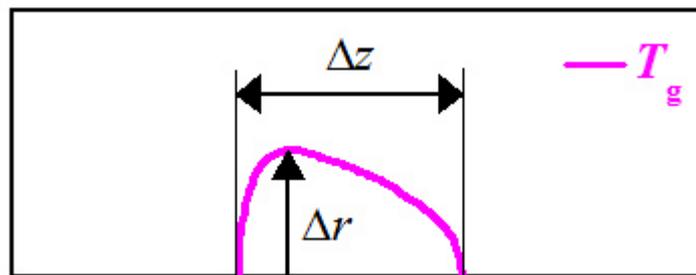
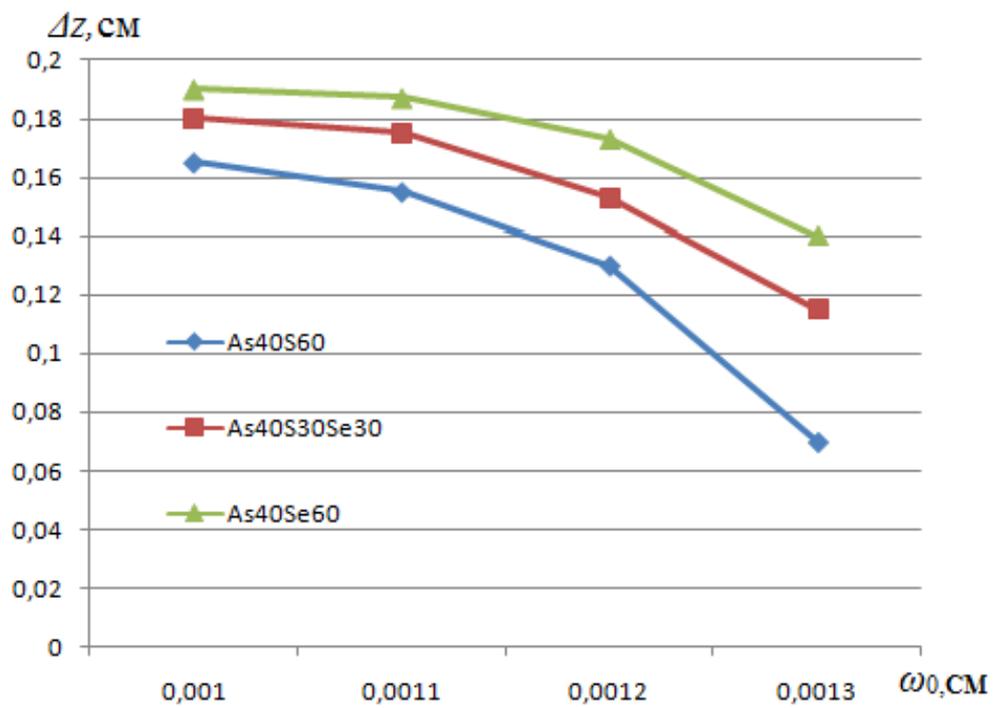


Рисунок 5. Определение поперечного и продольного размера области, нагретой до температуры выше  $T_g$ .

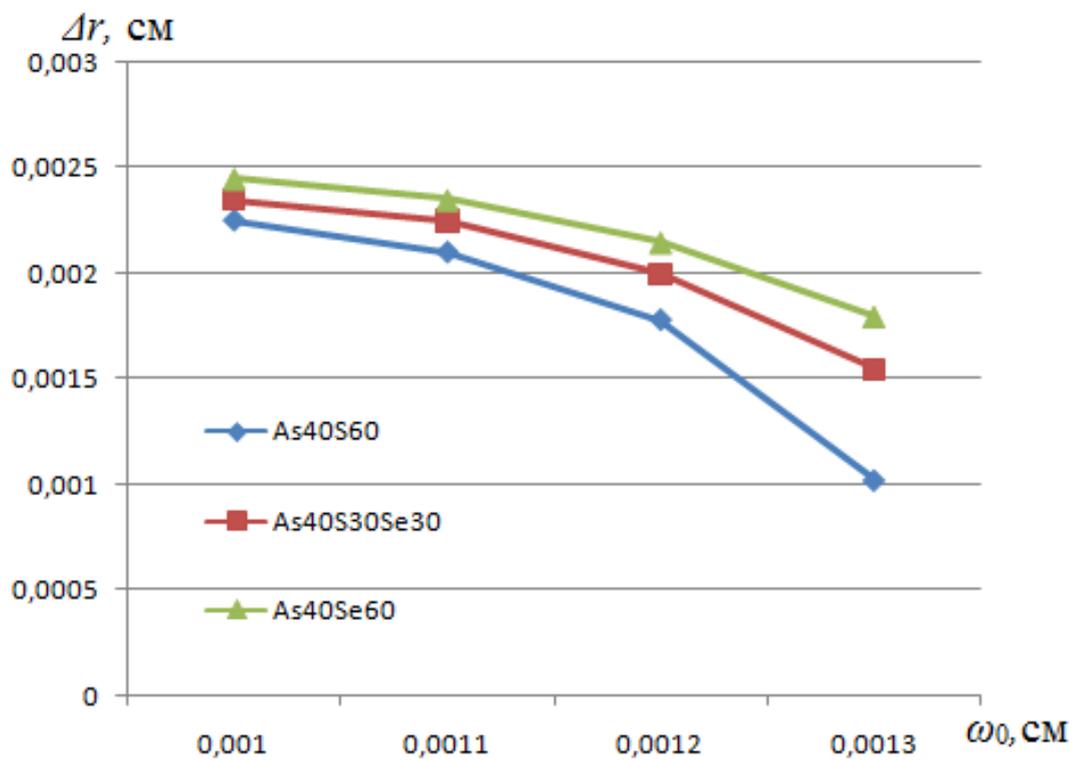
В таблице 1 приводятся максимальный продольный размер (длина) и максимальный поперечный размер (ширина) расплавленной области для каждого образца и каждой ширины пучка в образце. На рисунке 6. показаны  $\Delta z$  и  $\Delta r$ , а на рисунке 7- их отношение при разных  $\omega_0$ .

Таблица 1

Образец	$\omega_0= 0.001$ см		$\omega_0= 0.0011$ см		$\omega_0= 0.0012$ см		$\omega_0= 0.0013$ см	
	$\Delta z$ , см	$\Delta r$ , см	$\Delta z$ , см	$\Delta r$ , см	$\Delta z$ , см	$\Delta r$ , см	$\Delta z$ , см	$\Delta r$ , см
As <sub>40</sub> S <sub>60</sub>	0.165	0.00225	0.155	0.0021	0.13	0.00178	0.07	0.00102
As <sub>40</sub> S <sub>30</sub> Se <sub>30</sub>	0.18	0.00235	0.175	0.00225	0.153	0.002	0.115	0.00155
As <sub>40</sub> Se <sub>60</sub>	0.19	0.00245	0.187	0.00235	0.173	0.00215	0.14	0.0018



a)



б)

Рисунок 6. Зависимость длины (а) и ширины (б) модифицированной области от ширины светового пучка в образце

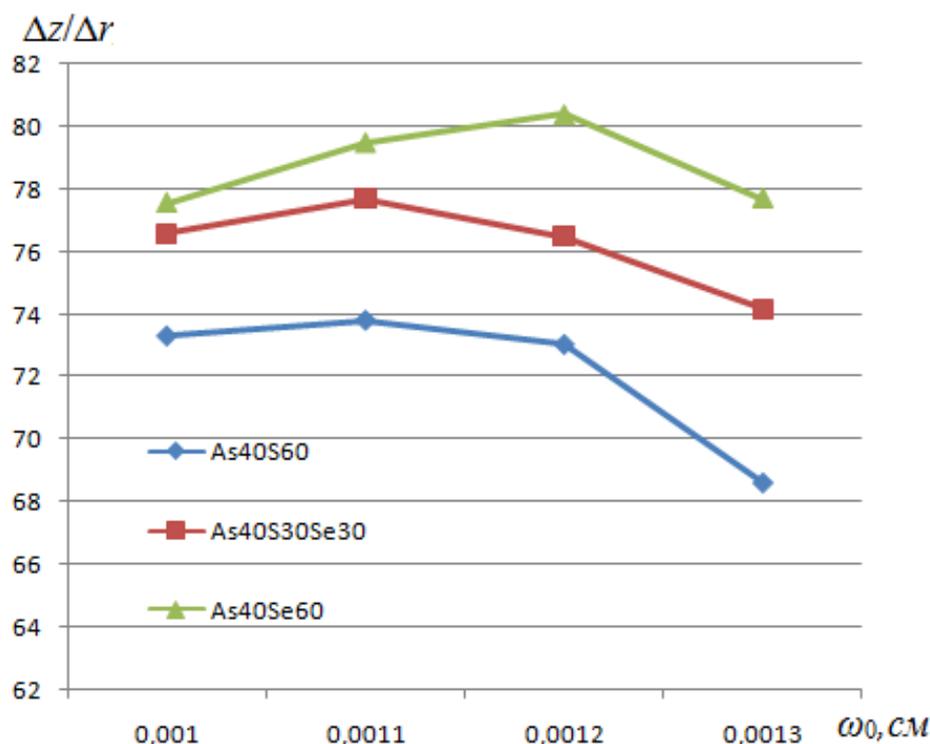


Рисунок 7. Зависимость отношения длины к ширине модифицированной области от ширины светового пучка в образце

Из графиков на рисунке 6 видно, что за счёт изменения радиуса перетяжки светового пучка в образце изменяются продольный и поперечный размеры расплавленной области. В каждом из исследуемых образцов при уменьшении  $\omega_0$ , величины  $\Delta z$  и  $\Delta r$  становятся больше, поскольку при этом растёт интенсивность на оси пучка. В образце с большей температурой плавления ( $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ ), размеры областей меньше, чем в других образцах с меньшей  $T_g$ . В этом же образце  $\Delta z$  и  $\Delta r$  сильнее зависят от  $\omega_0$ . Так, при изменении  $\omega_0$  от 0.001 до 0.0013 см (от 10 до 13 мкм) как длина, так и ширина модифицированной области уменьшается более чем в 2 раза. В образце  $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$  при таком же изменении  $\omega_0$  длина и ширина модифицированной области уменьшаются более менее, чем в 1.5 раза.

Форма модифицированной области, как видно из рисунка 7, также зависит от  $\omega_0$ . При увеличении  $\omega_0$  во всех трех образцах отношение  $\Delta z/\Delta r$  вначале несколько растёт, а затем уменьшается. Это значит, что при большом радиусе лазерного пучка в образце можно получить область менее вытянутой формы. При этом в образце  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  с большей  $T_g$  область несколько менее вытянута по

сравнению с другими образцами. Во всех образцах продольный размер модифицированной области намного больше поперечного.

Таким образом, меняя радиус сфокусированного светового пучка в образце, можно варьировать размеры и форму модифицированной области. Согласно формуле (5), радиус пучка можно менять, варьируя фокусное расстояние линзы и релеевскую длину, которая зависит от длины волны излучения и ширины пучка перед фокусирующей линзой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе проведено исследование теплофизических процессов в образцах халькогенидного стекла системы As-S-Se, облученных нестационарными лазерными пучками большой интенсивности.

Для описания распространения нестационарного лазерного пучка в среде с нелинейным поглощением в работе использован приближенный подход, позволяющий получить аналитически выражения для определения доли поглощенной энергии и распределения температуры при разных условиях фокусировки пучка. Показано, что доля полной поглощенной энергии уменьшается с ростом фокусного расстояния линзы. Проведен расчет пространственного распределения температуры в образце стекла, при воздействии сфокусированного лазерного пучка, при заданной пороговой интенсивности нелинейного поглощения в зависимости от ширины пучка в образце. Определены размеры областей, нагретых выше температуры плавления образцов стекла разного состава, которые соответствуют областям с модифицированными оптическими свойствами (например, с большим показателем преломления). Установлено, что изменяя радиус сфокусированного пучка в образце, можно варьировать размеры и форму модифицированной области.

Результаты работы представляют интерес для развития технологии создания структур в объеме стекла методом лазерных модификаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shane M. Eaton, Haibin Zhang, Peter R. 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. Rayner D.M., Naumov A., Corkum P.B., Ultra short pulse nonlinear optical absorption in transparent media, Optics Express, V. 13, 2005, pp. 3208-3217.
3. S.M.Eaton, H.Zhang, P.R.Herman, F.Yoshino, L.Shah, J.Bovatsek, A.Y.Arai, Heat accumulation effects in femtosecond laser-written waveguides with variable repetition rate, Optics Express, V.13, No.12, 2005, pp.4708-4716.
4. A.L.Gaeta, Catastrophic Collapse of Ultrashort Pulses, Phys.Rev.Lett., Vol.84, N.16, 2000 pp.3582-3585.
5. Минаев В.С. Стеклообразные полупроводниковые сплавы / В.С.Минаев. М: Металлургия, 1991.
6. Sheik-Bahaе M., Hutchings D.C., Van Stryland E.W. –Dispersion or bound electronic nonlinear reflection in solids // IEEE J. of Quantum Electron. 1991. V. 27. №6. P.1296.
7. B.C. Stuart et al.: Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics, Phys. Rev .B, vol. 53, pp. 1749-1761, Jan. 1996-II.
8. E. Romanova et al.: Femtosecond laser processing as an advantageous 3-D technology for the fabrication of highly nonlinear chip-scale photonic devices, J. of Lightwave Technol., vol. 27, pp. 3275-3282, 2009.
9. E.A. Romanova, A.I. Konyukhov: Study of irradiation conditions and thermodynamics of optical glass in the problem of materials modification by femtosecond laser pulses, Opt. and Spectroscopy, vol. 104. pp. 784-790, May 2008.
10. Rodney W. S., Malitson I. H., King T.A. // JOSA. 1958.V. 48. P. 633.
11. М.Н. Либенсон, Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина, Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). ИТМО. 2015
12. А.Г. Коротких Теплопроводность материалов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011
13. Мэйтленд А., Данн М. Введение в физику лазеров (1978)