

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1003-1013

УДК 532.211; 544.032.65

**Абляция объемного халькогенидного стекла As_2Se_3
при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами
с высокой частотой следования****Александра Андреевна Шамова¹✉, Дмитрий Сергеевич Поляков²,
Артур Джуракулович Долгополов³, Дмитрий Васильевич Панькин⁴,
Галина Дмитриевна Шандыбина⁵**^{1,2,3,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Научный парк, Ресурсный центр «Оптические и лазерные методы исследования вещества», Санкт-Петербург, Петергоф, 198504, Российская Федерация¹ aashamova@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8728-260X>² polyakovdmitry1988@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6240-4057>³ addolgovpolov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>⁴ dmitrii.pankin@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3114-3410>⁵ corchand@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3501-1925>**Аннотация**

Введение. Фемтосекундная лазерная обработка халькогенидных стекол является перспективным методом высокоточной модификации их структуры и свойств для разработки оптических элементов инфракрасной фотоники. Одной из актуальных задач остается повышение скорости обработки стекла при обеспечении высокой пространственной точности и минимальных термических повреждений. При использовании режимов лазерного облучения с высокой частотой следования импульсов, обеспечивающих повышение производительности технологий, изменяются механизмы фазово-химических превращений и возрастает вклад накопительного нагрева. Однако динамика этих процессов в объемном материале остается недостаточно изученной. В работе предложено определение механизма изменения фазового и химического составов объемного халькогенидного стекла из селенида мышьяка (As_2Se_3) под действием серии фемтосекундных лазерных импульсов в режимах интенсивной абляции. **Метод.** В качестве объекта исследования используются пластины халькогенидного стекла As_2Se_3 , подвергнутые воздействию фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм и частотой следования вплоть до 1 МГц. Диагностика образцов проводится методами цифровой оптической микроскопии и рамановской спектроскопии. Теоретический анализ включает в себя как расчеты фотовозбуждения и нагрева полупроводника одиночным лазерным импульсом, так и расчеты накопительного нагрева поверхности образца с учетом трехмерного теплоотвода. **Основные результаты.** При частоте следования лазерных импульсов 1 кГц установлен порог одноимпульсной лазерной абляции и определены параметры степенной зависимости порога абляции от количества импульсов («инкубационный эффект»). Проведен детальный анализ морфологии облученных образцов и химического состава продуктов лазерной абляции, в ходе которого установлено образование аморфного селена ($a-Se$) и кристаллов арсенолита (As_2O_3). Теоретический анализ позволил оценить степени нагрева и фотовозбуждения халькогенидного стекла As_2Se_3 одиночным лазерным импульсом и выявил существенный вклад эффекта накопления тепла в нагрев поверхности при частоте следования импульсов 1 МГц. На основе совокупности полученных результатов установлен парофазный механизм преобразования фазового и химического состава в объемном халькогенидном стекле As_2Se_3 при лазерной абляции с частотой следования фемтосекундных импульсов 1 МГц. **Обсуждение.** Полученные результаты открывают перспективы для разработки высокопроизводительных технологий фемтосекундного лазерного микроструктурирования халькогенидных материалов в фотонике и сенсорике.

Ключевые слова

объемное халькогенидное стекло, селенид мышьяка, фемтосекундная лазерная абляция, рамановская спектроскопия

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № FSER-2025-0007).

Авторы выражают благодарность Ресурсному центру «Оптические и лазерные методы исследования вещества» (проект № 125021902439-8) Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Авторы также благодарны сотруднику Института лазерных технологий Университета ИТМО М.М. Сергееву за помощь в проведении экспериментов.

Ссылка для цитирования: Шамова А.А., Поляков Д.С., Долгополов А.Д., Панькин Д.В., Шандыбина Г.Д. Абляция объемного халькогенидного стекла As₂Se₃ при воздействии фемтосекундными лазерными импульсами с высокой частотой следования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1003–1013. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1003-1013

Ablation of bulk chalcogenide glass As₂Se₃ by high-repetition-rate femtosecond laser pulses

Alexandra A. Shamova^{1✉}, Dmitry S. Polyakov², Arthur D. Dolgoplov³,
Dmitrii V. Pankin⁴, Galina D. Shandybina⁵

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

⁴ St. Petersburg State University, Research Park, Center for Optical and Laser Materials Research, Saint Petersburg, Peterhof, 198504, Russian Federation

¹ aashamova@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8728-260X>

² polyakovdmitry1988@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6240-4057>

³ addolgoplov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>

⁴ dmitrii.pankin@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3114-3410>

⁵ corchand@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3501-1925>

Abstract

Femtosecond laser processing of chalcogenide glasses is a promising method for high-precision modification of their structure and properties for the development of optical elements for infrared photonics. One of the key challenges is to increase the processing speed while maintaining high spatial accuracy and minimal thermal damage. When using laser irradiation modes with a high pulse repetition rate, which ensures increased productivity of technologies, the mechanisms of phase-chemical transformations change and the contribution of accumulative heating increases. However, the dynamics of these processes in bulk material remains insufficiently studied. This paper studies the mechanism of phase and chemical composition transformation of As₂Se₃ bulk chalcogenide glass under the action of femtosecond laser pulses in the intense ablation modes. The objects of study are plates of chalcogenide glass As₂Se₃ irradiated by femtosecond laser pulses with a wavelength of 515 nm at repetition rates up to 1 MHz. The irradiated samples are analyzed using digital optical microscopy and Raman spectroscopy. Theoretical analysis includes both calculations of photoexcitation and heating of the semiconductor by a single laser pulse as well as calculations of accumulative heating of the sample surface, taking into account three-dimensional heat removal. The single-pulse laser ablation threshold was established at a laser pulse repetition rate of 1 kHz and the parameters of the power-law dependence of the ablation threshold on the number of pulses (incubation effect) were determined. A detailed analysis of the morphology of the irradiated samples and the chemical composition of the laser ablation products was carried out revealing the formation of amorphous selenium (*a*-Se) and arsenolite crystals (As₂O₃). Theoretical analysis allowed us to estimate the degree of heating and photoexcitation of As₂Se₃ chalcogenide glass by a single laser pulse and revealed a significant contribution of the heat accumulation effect to the surface temperature rise at a pulse repetition rate of 1 MHz. Based on the combined experimental and theoretical results obtained, a vapor-phase mechanism of phase and chemical transformation in As₂Se₃ bulk glass has been established during femtosecond laser ablation with a pulse repetition rate of 1 MHz. These findings open up prospects for the development of high-performance technologies for femtosecond laser microstructuring of chalcogenide materials in photonics and sensing applications.

Keywords

bulk chalcogenide glass, arsenic selenide, femtosecond laser ablation, Raman spectroscopy

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSER-2025-0007).

The authors acknowledge the Center for Optical and Laser Materials Research (Project No. 125021902439-8) of Research Park of Saint Petersburg State University.

The authors are also grateful to M.M. Sergeev, a staff member of the Institute of Laser Technologies at ITMO University, for assistance with the experiments.

For citation: Shamova A.A., Polyakov D.S., Dolgoplov A.D., Pankin D.V., Shandybina G.D. Ablation of bulk chalcogenide glass As₂Se₃ by high-repetition-rate femtosecond laser pulses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1003–1013 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1003-1013

Введение

Халькогенидные стекла, благодаря возможности реализации в них сверхбыстрых фазовых переходов и высокому показателю преломления, являются превосходным материалом для фотонных приложений, могут служить основой для получения новых материалов с уникальными оптическими функциями и широким спектральным диапазоном прозрачности — от ультрафиолетовой до длинноволновой инфракрасной областей [1]. Формирование таких свойств возможно за счет фемтосекундной лазерной обработки, обеспечивающей высокоточную модификацию материала на микро- и наноразмерах без значительного теплового воздействия.

В последние годы получен значительный экспериментальный материал по лазерной обработке халькогенидных стекол. Например, осаждение из паровой фазы многокомпонентных халькогенидных тонкопленочных стекол с последующей термической обработкой позволяет реализовать селективную кристаллизацию фаз и обеспечивает высокую фоточувствительность в широком спектральном диапазоне [2]. Оптические компоненты, состоящие из поверхностных структур микронного размера, полученных методом пространственно контролируемой прямой лазерной записи с последующим селективным травлением, позволяют управлять различными параметрами оптического волнового фронта — фазой, амплитудой, поляризацией и дисперсией [3]. Кроме того, массивы нанотвердий, сформированные на большой площади поверхности халькогенидного стекла из селенида мышьяка (As_2Se_3), демонстрируют потенциал для реализации структурного цвета [4]. Несмотря на достигнутый прогресс, ключевыми задачами остаются повышение производительности технологий фемтосекундной лазерной обработки и обеспечение устойчивости халькогенидных стекол к воздействию интенсивного лазерного излучения. Известно, что для металлов и полупроводников при низких частотах следования фемтосекундных лазерных импульсов определяющее значение отводится накоплению структурных изменений поверхности от импульса к импульсу [5]. При переходе к частотам следования лазерных импульсов порядка 10^5 – 10^6 Гц, представляющих технологический интерес, важную роль начинает играть эффект накопления тепла [6]. Механизмы фазовых превращений в халькогенидном стекле As_2Se_3 при воздействии серии фемтосекундных лазерных импульсов в режимах абляции на сегодняшний день остаются предметом активных исследований.

Целью работы является определение механизма изменения фазового и химического состава объемного халькогенидного стекла As_2Se_3 под действием серии фемтосекундных лазерных импульсов в режимах интенсивной абляции. Для этого проведен комплексный анализ, основанный на экспериментальных данных, полученных при лазерном облучении образцов в видимом диапазоне спектра при различных частотах следования импульсов, на результатах диагностики облученных образцов методами цифровой оптической микроскопии и рамановской спектроскопии, а также на теоретических

оценках температуры, достигаемой при воздействии одиночного импульса, «инкубационного эффекта» и накопительного нагрева поверхности халькогенидного стекла.

Методы и материалы

В качестве образцов использовались пластины неплавленного халькогенидного стекла As_2Se_3 толщиной около 3 мм, полученные методом ультразвуковой резки из массивного стекла, изготовленного прямым сплавлением материалов в соответствии со стехиометрическим составом в кварцевых ампулах. Обработка образцов проводилась в воздушной атмосфере при нормальном падении линейно поляризованного излучения фемтосекундного волоконного лазера ANTAUS-20W-20u/1M (ООО «АвестаПроект», Россия) на длине волны излучения $\lambda = 515$ нм с длительностью импульса $\tau = 224$ фс, энергией импульсов до 20 мкДж и частотой их следования f до 1 МГц. Излучение направлялось на поверхность образца линзой с фокусным расстоянием 45 мм с диаметром пятна излучения $d_0 \approx 30$ мкм (по уровню e^{-1}). Диаметр пятна рассчитан по известной методике [7]. Измерение средней мощности/энергии лазерного излучения проводилось с помощью измерителя Gentec-EO SOLO2 (Gentec Electro-Optics, Inc., Канада). Оптические изображения образцов были получены с помощью цифрового оптического микроскопа Axio Imager A1m (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия).

Структурные исследования химического состава были проведены с использованием метода спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), также известной как рамановская спектроскопия, в геометрии обратного рассеяния света на экспресс-рамановском спектрометре SENTERRA (Bruker, Германия). Возбуждение КРС осуществлялось с использованием полупроводникового лазера с длиной волны 785 нм. Мощность лазерного излучения под $10\times$ объективом с числовой апертурой 0,25 составляла 0,3 мВт, диаметр лазерного пятна в фокальной плоскости — примерно 10 мкм (по уровню e^{-2}). Спектры регистрировались в диапазоне 80 – 1545 cm^{-1} с использованием дифракционной решетки 1200 шт/мм. В экспресс-рамановском спектрометре SENTERRA размеры апертуры составляли 25×1000 мкм. Время накопления сигнала для съемки подбиралось индивидуально и варьировалось от 50 до 100 с. Каждое измерение повторялось дважды. Калибровка спектрометра перед измерениями и в ходе эксперимента проверялась по линии КРС кремния при $520,7$ cm^{-1} .

Аналитические расчеты накопительного лазерного нагрева выполнялись в программе Mathcad Prime 7.0, а численное моделирование процессов фотовозбуждения и нагрева объемного халькогенидного стекла As_2Se_3 одиночным фемтосекундным лазерным импульсом проводилось в программе, разработанной в рамках настоящей работы на языке программирования C (Си), которая не имеет аналогов в готовых математических пакетах.

Экспериментальные результаты

При фиксированной частоте следования фемтосекундных лазерных импульсов на поверхности халькогенидного стекла As_2Se_3 создается массив кратеров, в котором по вертикали изменяется количество лазерных импульсов N , а по горизонтали — плотность энергии Q_0 . Затем частота f изменяется, и формируется следующий массив кратеров. Оптические изображения типичных кратеров представлены на рис. 1. Вплоть до $f = 1$ кГц наблюдаются кратеры с ровным краем с образованием валика и с незначительным осаждением продуктов испарения (рис. 1, *a*). Повышение частоты следования импульсов до 1 МГц приводит к образованию кратеров, которое сопровождается факелом и изменением цвета поверхности как внутри кратеров, так и вокруг них (интенсивный красный цвет) (рис. 1, *b*).

Для определения порога абляции при низкой частоте следования импульсов ($f = 1$ кГц) и заданном их количестве N при гауссовом распределении интенсивности по сечению пучка воспользуемся методикой [7], учитывая отклонение формы кратеров от округлой [8]. На рис. 2, *a* представлены зависимости квадратов диаметров эллиптического кратера вдоль большой и малой осей от логарифма падающей энергии лазерного импульса для $N = 20$. Аналогичные зависимости были построены и для других значений N вплоть до 200. В результате аппроксимации полученного набора экспериментальных точек степенной функцией с помощью программы Microsoft Excel 2016 получено следующее уравнение: $y = 100,5 \times x^{0,94}$ (рис. 2, *b*). Путем сопоставления этой зависимости с известной моделью инкубационного эффекта $NQ_{th}(N) = Q_{th}(1)N^S$ [9] определены порог одноимпульсной абляции $Q_{th}(1)$ и коэффици-

ент инкубации S . Для халькогенидного стекла As_2Se_3 порог одноимпульсной абляции составил примерно $0,1$ Дж/см², что сопоставимо с данными, полученными в работе [10]. Это значение соответствует плотности мощности излучения $4,5 \cdot 10^{11}$ Вт/см² при длительности импульса $\tau = 224$ фс. Рассчитанный из экспериментальной зависимости коэффициент инкубации S для халькогенидного стекла As_2Se_3 при $f = 1$ кГц равен $0,94$. Таким образом, с ростом количества лазерных импульсов от 1 до 200 наблюдается снижение порога абляции примерно на 25 % (рис. 2, *c*), что подтверждает наличие выраженного инкубационного эффекта. В его основе лежит процесс накопления дефектов в материале, приводящий к структурным изменениям на поверхности стекла. Эти изменения, происходящие от импульса к импульсу, повышают поглощательную способность материала и, как следствие, снижают порог абляции.

Для проведения исследования химического состава продуктов абляции, осажденных на поверхности халькогенидного стекла, методом спектроскопии комбинационного рассеяния света сформирован кратер при плотности энергии $Q_0 \approx 0,7$ Дж/см² (что соответствует плотности мощности излучения $3,1 \cdot 10^{12}$ Вт/см² при $\tau = 224$ фс) и $N = 1000$. Зондирование проводилось по точкам на поверхности образца от периферии к центру кратера, включая области внутри и вокруг него.

Спектры КРС в первой области (вокруг кратера) и соответствующие им оптические изображения областей осажденных продуктов абляции при перемещении от периферии (точка 1) в направлении к кратеру (точки 2–5) представлены на рис. 3.

В спектре 1 отмечается только вклад от As_2Se_3 , положение максимума около 225 см⁻¹. В спектре 2 основной вклад вносят As_2Se_3 , а также кристалл редкого

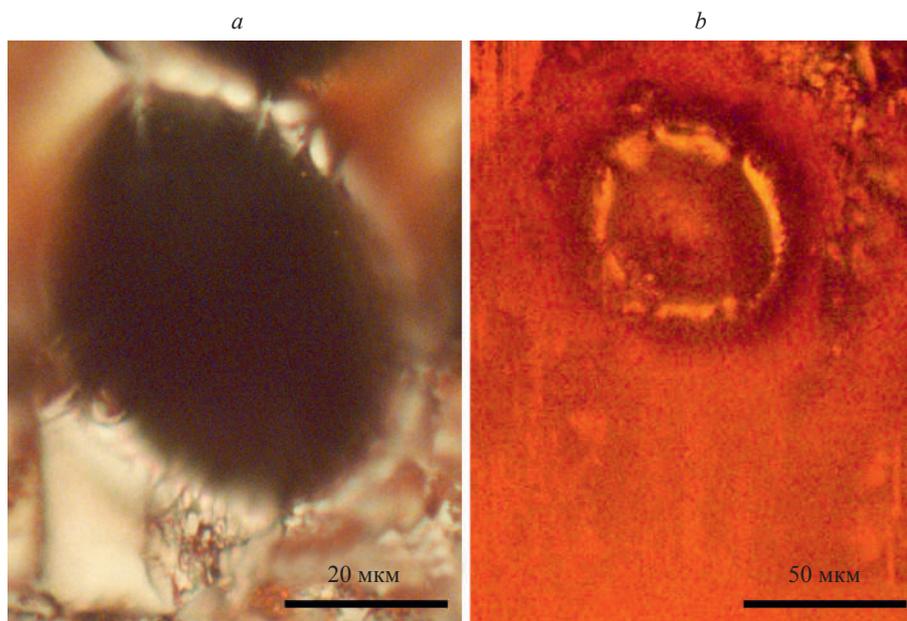


Рис. 1. Оптические изображения типичных кратеров на поверхности халькогенидного стекла As_2Se_3 , сформированных при облучении фемтосекундными лазерными импульсами: $Q_0 \approx 0,7$ Дж/см², $f = 1$ кГц (*a*); $Q_0 \approx 5$ мДж/см², $f = 1$ МГц (*b*) при $\lambda = 515$ нм, $\tau = 224$ фс, $N = 1000$

Fig. 1. Optical images of typical craters on the surface of As_2Se_3 chalcogenide glass formed by irradiation with femtosecond laser pulses at: $Q_0 \approx 0.7$ J/cm², $f = 1$ kHz (*a*); $Q_0 \approx 5$ mJ/cm², $f = 1$ MHz (*b*) ($\lambda = 515$ nm, $\tau = 224$ fs, $N = 1000$)

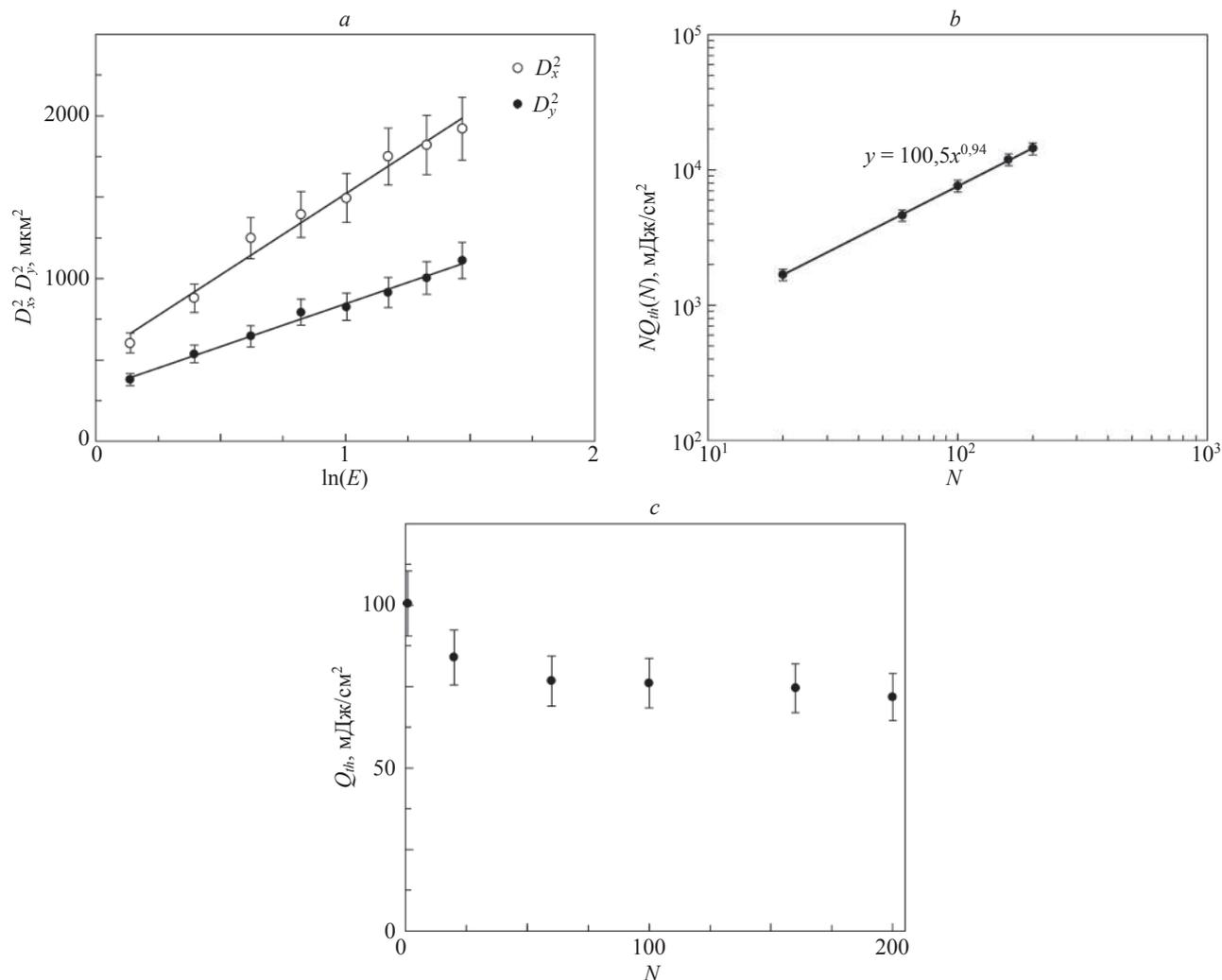


Рис. 2. Экспериментальная зависимость квадратов диаметров эллиптического кратера вдоль большой и малой осей от логарифма падающей энергии фемтосекундного лазерного импульса E при $f = 1$ кГц, $N = 20$ (a). Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией, подтверждающая наличие инкубационного эффекта (b). Зависимость порога абляции халькогенидного стекла As_2Se_3 от количества лазерных импульсов (c)

Fig. 2. Experimental dependence of the squares of the elliptical crater diameters along the major and minor axes versus the logarithm of the incident femtosecond laser pulse energy (E) at $f = 1$ kHz, $N = 20$ (a). The power-law fit of the experimental data confirming the incubation effect (b). Dependence of the ablation threshold of As_2Se_3 chalcogenide glass on the number of laser pulses (c)

и ядовитого минерала арсенолита — оксида мышьяка (As_2O_3) (пики 370, 470 и 558 cm^{-1}). Референсный спектр КРС As_2O_3 (номер 050383 в базе данных The RRUFF™ Project¹) приведен на рис. 3, b. Спектр 3 близок к спектру аморфного селена ($a\text{-Se}$), основная широкая полоса около 250 cm^{-1} , и достигается наибольшая относительная концентрация As_2O_3 . Спектр 4 подобен спектру $a\text{-Se}$, и присутствуют небольшие пики от As_2O_3 . В точке 5 спектр близок к спектру $a\text{-Se}$. Таким образом, по мере движения от необлученной области к участкам с осажденными продуктами абляции в спектрах КРС прослеживается следующая закономерность: $\text{As}_2\text{Se}_3 \rightarrow \text{As}_2\text{Se}_3 +$

$+ \text{As}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{As}_2\text{Se}_3 + \text{As}_2\text{O}_3 + a\text{-Se} \rightarrow a\text{-Se} + \text{As}_2\text{O}_3 \rightarrow a\text{-Se}$.

Во второй области (внутри кратера) характерной особенностью спектров КРС является преимущественный вклад от модифицированного лазером As_2Se_3 в аморфизованном стеклообразном состоянии. Под модификацией подразумевается изменение соотношения структурных единиц в стекле и/или появление новых связей по сравнению с исходным стеклом. Это проявляется в сдвиге максимума пика до 232 cm^{-1} и появлении явного плеча около 250 cm^{-1} , что может быть следствием кольцевых структур Se_8 [11]. Для точек внутри кратера отмечается относительно большая интенсивность рассеянного света в области 230–280 cm^{-1} по сравнению с немодифицированным стеклом.

Прежде чем выдвинуть обоснованную гипотезу о механизме наблюдаемых химических превращений, проведем анализ накопительного теплового

¹ The RRUFF™ Project database [сайт] Tucson [Электронный ресурс]. URL: <https://rruff.info/arsenolite/display=default/R050383> (дата обращения: 07.07.2025).

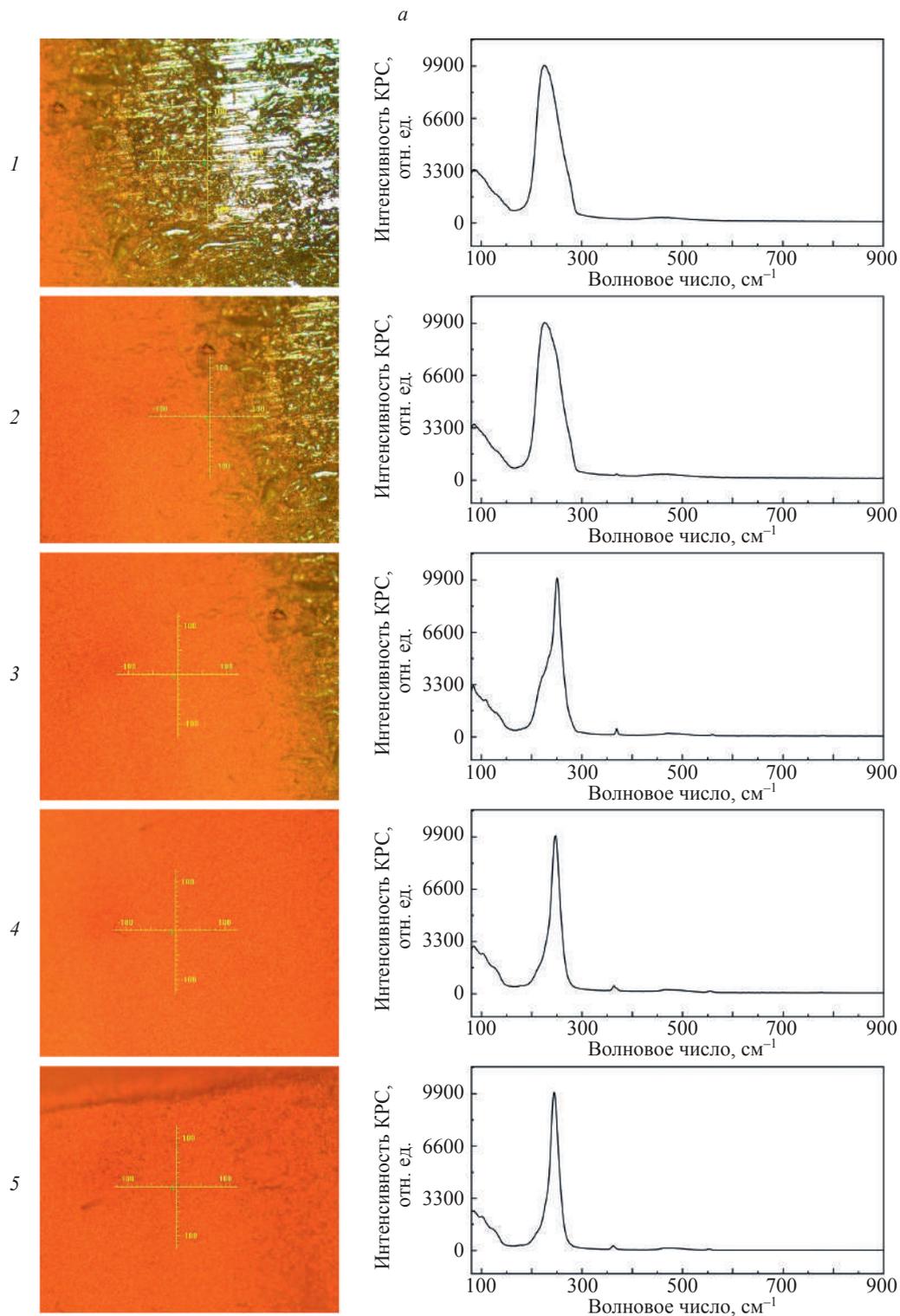


Рис. 3. Оптические изображения областей осажденных продуктов лазерной абляции при перемещении зонда от периферии (точка 1) к кратеру (точки 2–5) и соответствующие им спектры комбинационного рассеяния света в диапазоне 80–900 см^{-1} , нормированные на 10 000 отн. ед. ($\lambda = 515$ нм, $\tau = 224$ фс, $Q_0 \approx 0,7$ Дж/см 2 , $N = 1000$, $f = 1$ МГц) (а).

Спектры комбинационного рассеяния света в диапазоне 300–900 см^{-1} и референсный спектр комбинационного рассеяния света минерала арсенолита по данным базы The RRUFFTM Project¹ (б)

Fig. 3. Optical images of the areas with deposited laser ablation products obtained by moving the probe from the periphery (point 1) to the crater (points 2–5), and the corresponding Raman spectra in the range of 80–900 cm^{-1} , normalized to 10000 a.u. ($\lambda = 515$ нм, $\tau = 224$ fs, $Q_0 \approx 0.7$ J/cm 2 , $N = 1000$, $f = 1$ MHz) (a). Raman spectra in the range of 300–900 cm^{-1} and the reference Raman spectrum of the mineral arsenolite from The RRUFFTM Project database¹ (b)

¹ The RRUFFTM Project database [сайт] Tucson [Электронный ресурс]. URL: <https://rruff.info/arsenolite/display=default/R050383> (дата обращения: 07.07.2025).

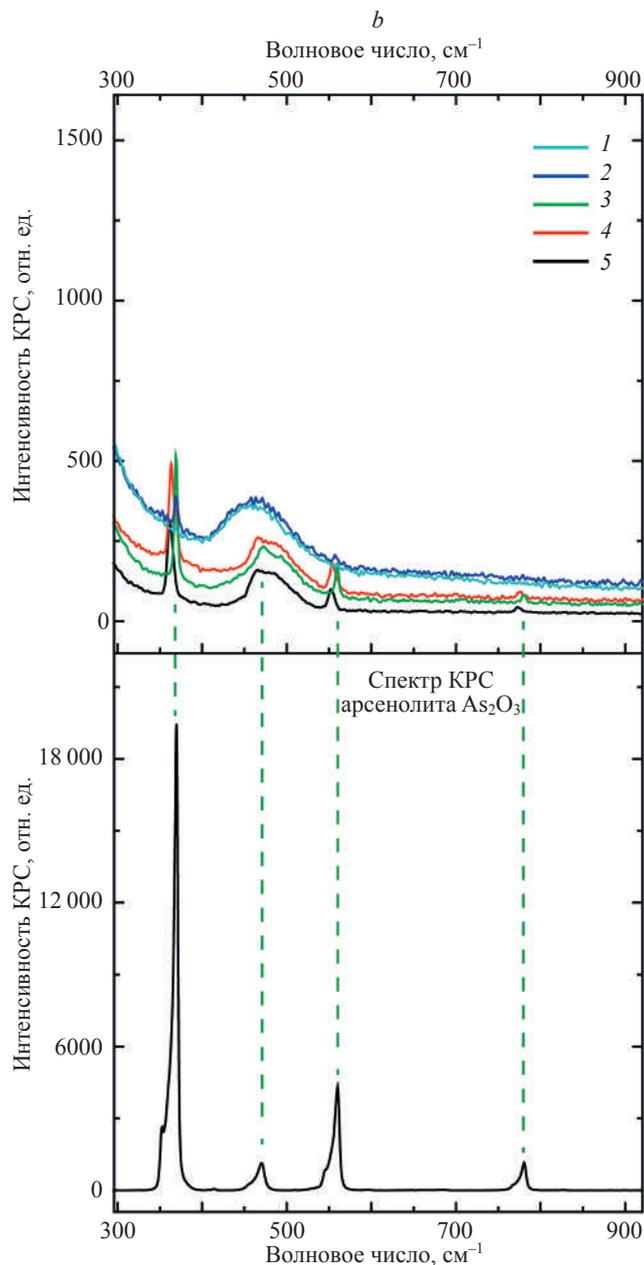


Рис. 3. Продолжение

Fig. 3. Continued

эффекта, который может сопровождать воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на халькогенидное стекло As_2Se_3 при частотах их следования более 1 кГц.

Математическое моделирование

Теоретический анализ нагрева и фотовозбуждения халькогенидного стекла одиночным ультракоротким лазерным импульсом строится на основе модели, рассмотренной в [12] для случая облучения тонкой пленки As_2Se_3 ультракоротким лазерным импульсом на длине волны 1030 нм, которая в настоящей работе была адаптирована для случая воздействия на длине волны 515 нм на объемный материал. В модель добавлен учет однофотонного поглощения с коэффициентом

поглощения $\beta_1 = 10^5 \text{ см}^{-1}$ [10]. Значение коэффициента двухфотонного поглощения для длины волны 515 нм $\beta_2 = 0,14 \text{ см}^2/\text{Вт}$ [13]. При расчетах использовались значения показателя преломления невозбужденного полупроводника $n = 3,4$ [14] и ширины запрещенной зоны $E_g = 1,85 \text{ эВ}$ [10]. Остальные параметры соответствуют использованным в работе [12].

Анализ накопительного нагрева поверхности материала при многоимпульсном лазерном облучении проводится с учетом трехмерного теплоотвода в условиях, когда длительность теплового действия импульса определяется временем перехода поглощенной энергии лазерного излучения в тепловую энергию (примерно 10^{-12} – 10^{-11} с) и мала по сравнению с периодом следования фемтосекундных лазерных импульсов, а глубина фотовозбужденной области существенно меньше дли-

ны теплопроводности $(4a/f)^{1/2}$, где a — коэффициент температуропроводности материала.

Воспользуемся моделью теплового источника в форме диска [15] (рис. 4). Тогда остаточная температура (т. е. температура поверхности материала после воздействия N импульсов в момент прихода $N + 1$ -го импульса) в центре пучка на поверхности материала определяется согласно следующему выражению

$$T_N = \frac{(1-R)Q_0}{c_i} \sqrt{\frac{f}{\pi a}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{i}(\psi i + 1)} + T_0, \quad (1)$$

где $R = 0,25$ — коэффициент отражения халькогенидного стекла As₂Se₃ [16]; $a = 1,9 \cdot 10^{-3}$ см²/с — коэффициент температуропроводности халькогенидного стекла As₂Se₃, рассчитанный по данным [17–19]; $\psi = \frac{4a}{f v_0^2}$ — безразмерный параметр; $T_0 = 300$ К — начальная температура.

Как видно из рис. 4, a при $Q_0 = 0,1$ Дж/см² (соответствует порогу одноимпульсной абляции) в течение лазерного импульса достигаются высокие концентрации фотовозбужденных носителей n_e около $6 \cdot 10^{21}$ см⁻³, а их температура T_e примерно 40 кК. Дальнейшая передача энергии в кристаллическую решетку за счет электрон-фононного взаимодействия приводит к выравниванию электронной и решеточной (T_i) температур на значении примерно 1900 К, что существенно превосходит как температуру плавления, так и кипения As₂Se₃ (примерно 1120 К [20]). Известно, что основными механизмами абляции твердых тел ультракороткими импульсами является «откольная» абляция, реализуемая при относительно малых плотностях энергии импульса, и «фазовый взрыв», реализующийся при дальнейшем повышении плотности энергии [21].

В настоящей работе абляция вблизи пороговых значений плотности энергии может быть ассоциирована с первым механизмом. При снижении плотности энергии до 5 мДж/см² (что соответствует плотности

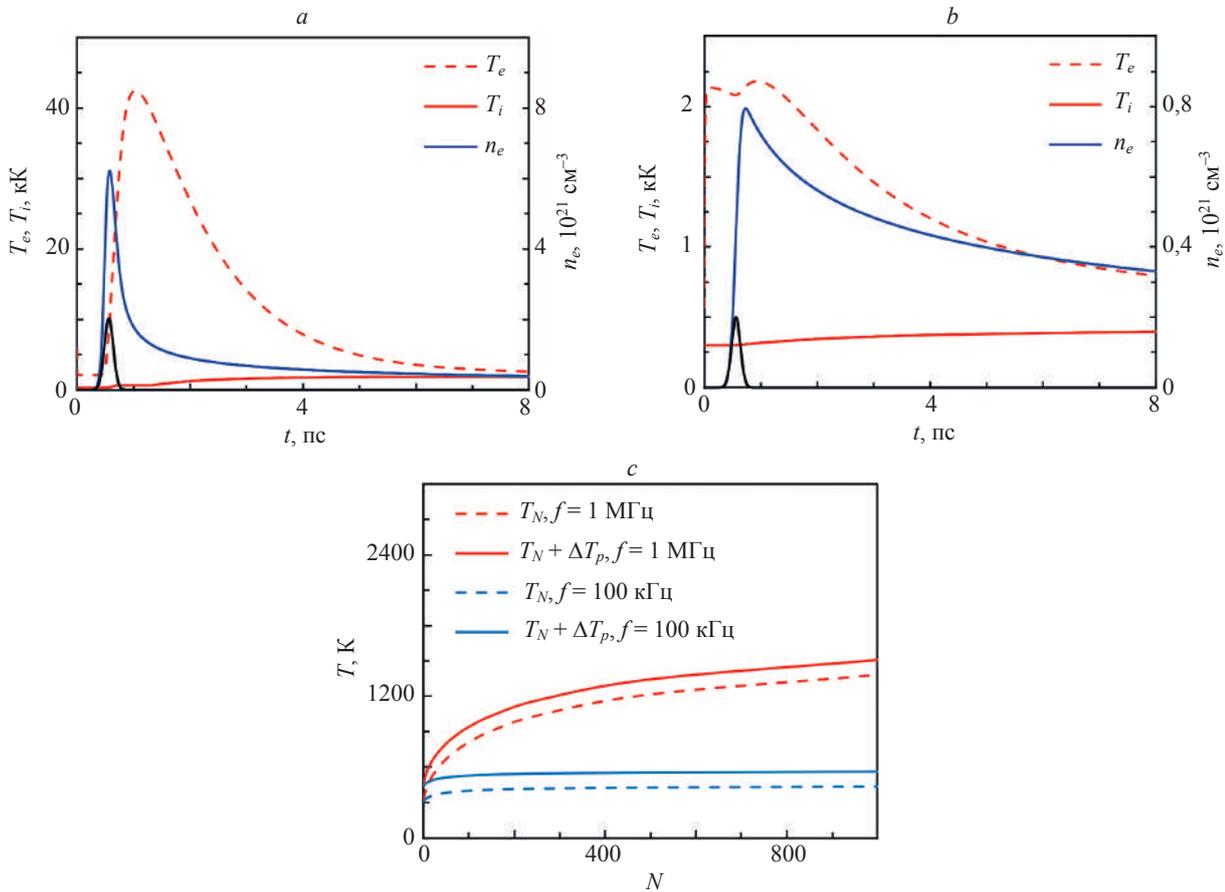


Рис. 4. Теоретические зависимости: электронной T_e и решеточной T_i температур, а также концентрации фотовозбужденных носителей n_e на поверхности халькогенидного стекла As₂Se₃ от времени для $Q_0 = 0,1$ Дж/см² (a) и $Q_0 = 5$ мДж/см² (b); остаточной температуры T_N и температуры $T_N + \Delta T_p$ в центре лазерного пятна на поверхности халькогенидного стекла

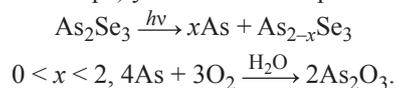
As₂Se₃ от количества импульсов при разных частотах их следования (c), при $\lambda = 515$ нм, $\tau = 224$ фс, $d_0 = 30$ мкм, $Q_0 = 5$ мДж/см². Черная кривая (рис. 4, a, b) — форма импульса; ΔT_p — приращение температуры поверхности за импульс
Fig. 4. Theoretical dependences of: the electron (T_e) and lattice (T_i) temperatures as well as the concentration of photoexcited carriers (n_e) on the surface of As₂Se₃ chalcogenide glass on time for $Q_0 = 0.1$ J/cm² (a) and $Q_0 = 5$ mJ/cm² (b) (the black curve represents the pulse shape); the residual temperature T_N and temperature $T_N + \Delta T_p$ (where ΔT_p is the surface temperature increase per pulse) in the center of the laser spot on the surface of As₂Se₃ chalcogenide glass on the number of pulses at different repetition rates (c) ($\lambda = 515$ nm, $\tau = 224$ fs, $d_0 = 30$ μ m, $Q_0 = 5$ mJ/cm²)

мощности излучения $2,2 \cdot 10^{10}$ Вт/см² при $\tau = 224$ фс) концентрация фотовозбужденных носителей составляет около $0,8 \cdot 10^{21}$ см⁻³, а их температура достигает примерно 2000 К (рис. 4, *b*). После передачи энергии в кристаллическую решетку через электрон-фононное взаимодействие температура решетки повышается до примерно 430 К (т. е. приращение температуры за импульс $\Delta T_p = 130$ К), что, очевидно, недостаточно для абляции материала за 1 импульс. При многоимпульсном лазерном облучении с той же плотностью энергии ($f = 1$ МГц и $N = 1000$) остаточная температура поверхности T_N , определяемая согласно выражению (1), может превышать температуру кипения As_2Se_3 (рис. 4, *c*). Таким образом, в этом случае за счет накопительного нагрева может реализовываться механизм нормального испарения, не характерный для воздействия одиночных лазерных импульсов, что соответствует условиям образования большого количества паров селена (Se) с последующим осаждением аморфной фазы, наблюдаемым в эксперименте (рис. 1, *b*). При этом снижение частоты следования импульсов до 100 кГц приводит к снижению остаточной температуры до значений около 500 К, а при частоте 1 кГц значения остаточной температуры не превосходят 1 К (не показано на рис. 4), т. е. в этом случае эффект накопления тепла пренебрежимо мал.

Важно отметить, что при плотностях энергии $Q_0 > 0,1$ Дж/см² в условиях многоимпульсного облучения ($f = 1$ МГц, $N = 1000$) накопительный нагрев способствует достижению высоких температур, при которых, кроме *a*-Se, также наблюдается интенсивное образование кристаллов As_2O_3 (рис. 3).

Обсуждение

В работе [22] был предложен механизм реакции фоторазложения As_2Se_3 под действием лазерного излучения видимого диапазона, согласно которому поглощение фотона с энергией, превышающей запрещенную зону, приводит к разрыву связей и образованию атомов мышьяка (As), которые могут свободно диффундировать в стекле и в присутствии водяного пара (H_2O) (в качестве катализатора) участвовать в образовании As_2O_3 :



При этом предполагалось, что все химические превращения в халькогенидном стекле реализуются в твердой фазе.

В [23] при изучении абляции пленок сульфида мышьяка и As_2Se_3 в режимах сканирования фемтосекундных лазерных импульсов с высокой частотой следования ($\lambda = 1030$ нм), обнаружили образование кристаллов As_2O_3 на абляционных линиях лазерной записи. Для объяснения химических превращений состава пленки в работе [23] также использован твердофазный механизм реакции фоторазложения As_2Se_3 , предложенный в работе [22].

Впервые на возможность развития окислительно-восстановительных реакций не в твердой, а в паро-

вой фазе при короткоимпульсной лазерной абляции металлов на воздухе было указано в работе [24]. Позднее в [25] была разработана химико-гидродинамическая модель развития химических реакций в плазменном факеле как основном механизме образования оксидных слоев на поверхности титана. Проведенное в настоящей работе исследование продуктов лазерной абляции и рассчитанные значения температуры позволяют предположить, что окислительно-восстановительные процессы в объемном халькогенидном стекле As_2Se_3 развиваются в паровой фазе при частотах следования фемтосекундных лазерных импульсов порядка 1 МГц.

В настоящей работе в условиях интенсивного накопительного нагрева халькогенидное стекло плавится и испаряется. Над поверхностью абляции образуется плазменный факел. Плазма изначально состоит из паров Se и As. По мере расширения As в паровой фазе вступает во взаимодействие с атмосферным кислородом (O_2) и возвращается на поверхность в виде As_2O_3 . Парофазный механизм включает: испарение As_2Se_3 , образование паров Se и As, окисление As в паровой фазе при взаимодействии с O_2 и осаждение As_2O_3 и *a*-Se на поверхность образца. Поскольку As является летучим компонентом, он распространяется на большие расстояния от облученной области, что выражается в неравномерном осаждении As_2O_3 на поверхности образца. *a*-Se осаждается преимущественно ближе к кратеру. В самом же кратере образуется модифицированный As_2Se_3 с повышенной концентрацией кольцевых структур Se_8 .

Заключение

Экспериментально определен порог одноимпульсной абляции объемного халькогенидного стекла As_2Se_3 при низкой частоте следования фемтосекундных лазерных импульсов ($f = 1$ кГц) на длине волны 515 нм, который составил порядка $0,1$ Дж/см². Рассчитан коэффициент инкубации $S = 0,94$, характеризующий снижение порога абляции с увеличением количества импульсов. Представленные оценки температур нагрева за один импульс хорошо коррелируют с экспериментально определенным порогом одноимпульсной абляции и могут быть использованы в дальнейшем для анализа процессов взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с халькогенидным стеклом As_2Se_3 на длине волны 515 нм. При увеличении частоты следования импульсов до 1 МГц значительным становится накопительный тепловой эффект. Результаты теоретического моделирования продемонстрировали, что при многоимпульсном фемтосекундном лазерном воздействии с частотой следования импульсов 1 МГц накопительный нагрев на поверхности халькогенидного стекла As_2Se_3 может достигать температур, превосходящих температуру кипения As_2Se_3 , и способствовать активному развитию парофазных окислительно-восстановительных процессов.

Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации режимов фемтосекундного микроструктурирования халькогенидных стекол при высокой частоте следования лазерных импульсов.

Литература

References

- Shirshnev P.S., Kang M., Divliansky I., Richardson K.A., Glebov L.B. Engineered refractive and diffractive optical composites via photo-thermal processes // *Optical Materials Express*. 2022. V. 12. N 9. P. 3429–3448. <https://doi.org/10.1364/ome.465711>
- Kang M., Swisher A.M., Pogrebnyanov A.V., Liu L., Kirk A., Aiken S., et al. Ultralow dispersion multicomponent thin-film chalcogenide glass for broadband gradient-index optics // *Advanced Materials*. 2018. V. 30. N 39. P. 1803628. <https://doi.org/10.1002/adma.201803628>
- Kang M., Triplett B.M., Shalaginov M.Y., Deckoff-Jones S., Blanco C., Truman M., et al. Photochemically engineered large-area arsenic sulfide micro-gratings for hybrid diffractive–refractive infrared platforms // *Advanced Photonics Research*. 2024. V. 5. N 1. P. 2300241. <https://doi.org/10.1002/adpr.202300241>
- Li Z., Shangguan S., Shi W., Wang W., Qi D., Chen F., Zheng H. Femtosecond laser induced periodic subwavelength nanohole arrays structure on As₂Se₃ glass surface // *Ceramics International*. 2024. V. 51. N 7. P. 8211–8218. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.302>
- Guk I.V., Kuzmin E.V., Shandybina G.D., Yakovlev E.B., Dyukin R.V., Kulagin V.S. Influence of multi-pulse action on the evolution of silicon microrelief under femtosecond laser irradiation // *Journal of Optical Technology*. 2017. V. 84. N 7. P. 462–466. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000462>
- Fraggelakis F., Mincuzzi G., Lopez J., Manek-Honninger I., Kling R. Texturing metal surface with MHz ultra-short laser pulses // *Optics Express*. 2017. V. 25. N 15. P. 18131–18139. <https://doi.org/10.1364/OE.25.018131>
- Liu J.M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes // *Optics Letters*. 1982. V. 7. N 5. P. 196–198. <https://doi.org/10.1364/OL.7.000196>
- Струлёва Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Термомеханическая абляция титана при фемтосекундном лазерном воздействии // *Теплофизика высоких температур*. 2019. Т. 57. № 4. С. 529–533. <https://doi.org/10.1134/S0040364419040215>
- Jee Y., Becker M.F., Walser R.M. Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces // *Journal of the Optical Society of America B*. 1988. V. 5. N 3. P. 648–659. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.5.000648>
- Li Q., Qi D., Wang X., Shen X., Wang R., Tanaka K. Femto- and nano-second laser-induced damages in chalcogenide glasses // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2019. V. 58. N 8. P. 080911. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab3368>
- Kovanda V., Vlček M., Jain H. Structure of As–Se and As–P–Se glasses studied by Raman spectroscopy // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003. V. 326-327. P. 88–92. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(03\)00383-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00383-1)
- Shamova A., Polyakov D., Golubkov V., Pankin D., Shimko A., Shandybina G. Processes accompanying ablation in thin-film and bulk chalcogenide glass As₂Se₃ under multipulse femtosecond laser irradiation // *Optical Materials*. 2025. V. 167. P. 117232. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.117232>
- Zakery A., Elliott S.R. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003. V. 330. N 1-3. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064>
- Joseph S., Sarkar S., Joseph J. Grating-coupled surface plasmon-polariton sensing at a flat metal–analyte interface in a hybrid-configuration // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. V. 12. N 41. P. 46519–46529. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12525>
- Polyakov D., Shandybina G., Shamova A. Analytical 3D modeling of accumulative heating under multipulse laser irradiation of inorganic materials and biological tissues // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. V. 31. P. 101284. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101284>
- Sobolev V.V. Optical spectra of arsenic chalcogenide glasses over a wide energy range of fundamental absorption // *Glass Physics and Chemistry*. 2002. V. 28. N 6. P. 399–416. <https://doi.org/10.1023/A:1021719017568>
- Easteal A.J., Wilder J.A., Mohr R.K., Moynihan C.T. Heat capacity and structural relaxation of enthalpy in As₂Se₃ glass // *Journal of the American Ceramic Society*. 1977. V. 60. N 3-4. P. 134–138. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1977.tb15488.x>
- Knotek P., Kutálek P., Černošková E., Vlček M., Tichý L. The density, nanohardness and some optical properties of As–S and As–Se
- Shirshnev P.S., Kang M., Divliansky I., Richardson K.A., Glebov L.B. Engineered refractive and diffractive optical composites via photo-thermal processes. *Optical Materials Express*, 2022, vol. 12, no. 9, pp. 3429–3448. <https://doi.org/10.1364/ome.465711>
- Kang M., Swisher A.M., Pogrebnyanov A.V., Liu L., Kirk A., Aiken S., et al. Ultralow dispersion multicomponent thin-film chalcogenide glass for broadband gradient-index optics. *Advanced Materials*, 2018, vol. 30, no. 39, pp. 1803628. <https://doi.org/10.1002/adma.201803628>
- Kang M., Triplett B.M., Shalaginov M.Y., Deckoff-Jones S., Blanco C., Truman M., et al. Photochemically engineered large-area arsenic sulfide micro-gratings for hybrid diffractive–refractive infrared platforms. *Advanced Photonics Research*, 2024, vol. 5, no. 1, pp. 2300241. <https://doi.org/10.1002/adpr.202300241>
- Li Z., Shangguan S., Shi W., Wang W., Qi D., Chen F., Zheng H. Femtosecond laser induced periodic subwavelength nanohole arrays structure on As₂Se₃ glass surface. *Ceramics International*, 2024, vol. 51, no. 7, pp. 8211–8218. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.302>
- Guk I.V., Kuzmin E.V., Shandybina G.D., Yakovlev E.B., Dyukin R.V., Kulagin V.S. Influence of multi-pulse action on the evolution of silicon microrelief under femtosecond laser irradiation. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 7, pp. 462–466. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000462>
- Fraggelakis F., Mincuzzi G., Lopez J., Manek-Honninger I., Kling R. Texturing metal surface with MHz ultra-short laser pulses. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 15, pp. 18131–18139. <https://doi.org/10.1364/OE.25.018131>
- Liu J.M. Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes. *Optics Letters*, 1982, vol. 7, no. 5, pp. 196–198. <https://doi.org/10.1364/OL.7.000196>
- Struleva E.V., Komarov P.S., Ashitkov S.I. Thermomechanical ablation of titanium by femtosecond laser irradiation. *High Temperature*, 2019, vol. 57, no. 4, pp. 486–489. <https://doi.org/10.1134/s0018151x19040217>
- Jee Y., Becker M.F., Walser R.M. Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, vol. 5, no. 3, pp. 648–659. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.5.000648>
- Li Q., Qi D., Wang X., Shen X., Wang R., Tanaka K. Femto- and nano-second laser-induced damages in chalcogenide glasses. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 58, no. 8, pp. 080911. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab3368>
- Kovanda V., Vlček M., Jain H. Structure of As–Se and As–P–Se glasses studied by Raman spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, vol. 326-327, pp. 88–92. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(03\)00383-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00383-1)
- Shamova A., Polyakov D., Golubkov V., Pankin D., Shimko A., Shandybina G. Processes accompanying ablation in thin-film and bulk chalcogenide glass As₂Se₃ under multipulse femtosecond laser irradiation. *Optical Materials*, 2025, vol. 167, pp. 117232. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.117232>
- Zakery A., Elliott S.R. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, vol. 330, no. 1-3, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2003.08.064>
- Joseph S., Sarkar S., Joseph J. Grating-coupled surface plasmon-polariton sensing at a flat metal–analyte interface in a hybrid-configuration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, vol. 12, no. 41, pp. 46519–46529. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12525>
- Polyakov D., Shandybina G., Shamova A. Analytical 3D modeling of accumulative heating under multipulse laser irradiation of inorganic materials and biological tissues. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 31, pp. 101284. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101284>
- Sobolev V.V. Optical spectra of arsenic chalcogenide glasses over a wide energy range of fundamental absorption. *Glass Physics and Chemistry*, 2002, vol. 28, no. 6, pp. 399–416. <https://doi.org/10.1023/A:1021719017568>
- Easteal A.J., Wilder J.A., Mohr R.K., Moynihan C.T. Heat capacity and structural relaxation of enthalpy in As₂Se₃ glass. *Journal of the American Ceramic Society*, 1977, vol. 60, no. 3-4, pp. 134–138. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1977.tb15488.x>
- Knotek P., Kutálek P., Černošková E., Vlček M., Tichý L. The density, nanohardness and some optical properties of As–S and As–Se

- chalcogenide bulk glasses and thin films // RSC Advances. 2020. V. 10. N 70. P. 42744–42753. <https://doi.org/10.1039/D0RA08939G>
19. Flasck R., Rockstad H.K. The thermal conductivity of some chalcogenide glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1973. V. 12. N 3. P. 353–356. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(73\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0022-3093(73)90007-0)
 20. Baker E.H. Arsenic triselenide: boiling-point relation at elevated pressures // *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*. 1975. N 15. P. 1589–1591. <https://doi.org/10.1039/DT9750001589>
 21. Shugaev M.V., He M., Levy Y., Mazzi A., Miotello A., Bulgakova N.M., Zhigilei L.V. Laser-induced thermal processes: heat transfer, generation of stresses, melting and solidification, vaporization, and phase explosion // *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*. 2021. P. 83–163. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63647-0_11
 22. Berkes J.S., Ing S.W., Hillegas W.J. Photodecomposition of amorphous As₂Se₃ and As₂S₃ // *Journal of Applied Physics*. 1971. V. 42. N 12. P. 4908–4916. <https://doi.org/10.1063/1.1659873>
 23. Paula K.T., Dutta N.S., Almeida J.M., Nolasco L.K., Andrade M.B., Arnold C.B., Mendonça C.R. Femtosecond laser induced damage threshold incubation and oxidation in As₂S₃ and As₂Se₃ thin films // *Applied Surface Science*. 2024. V. 654. P. 159449. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159449>
 24. Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д., Шахмин А.Л. Химический анализ продуктов лазерной абляции наносекундного диапазона // *Журнал технической физики*. 2000. Т. 70. N 9. С. 124–127.
 25. Gornushkin I.B., Veiko V.P., Karlagina Yu.Yu., Samokhvalov A.A., Polyakov D.S. Equilibrium model of titanium laser induced plasma in air with reverse deposition of titanium oxides // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2022. V. 193. P. 106449. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106449>
- chalcogenide bulk glasses and thin films. *RSC Advances*, 2020, vol. 10, no. 70, pp. 42744–42753. <https://doi.org/10.1039/D0RA08939G>
19. Flasck R., Rockstad H.K. The thermal conductivity of some chalcogenide glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 353–356. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(73\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0022-3093(73)90007-0)
 20. Baker E.H. Arsenic triselenide: boiling-point relation at elevated pressures. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 1975, no. 15, pp. 1589–1591. <https://doi.org/10.1039/DT9750001589>
 21. Shugaev M.V., He M., Levy Y., Mazzi A., Miotello A., Bulgakova N.M., Zhigilei L.V. Laser-induced thermal processes: heat transfer, generation of stresses, melting and solidification, vaporization, and phase explosion. *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*, 2021, pp. 83–163. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63647-0_11
 22. Berkes J.S., Ing S.W., Hillegas W.J. Photodecomposition of amorphous As₂Se₃ and As₂S₃. *Journal of Applied Physics*, 1971, vol. 42, no. 12, pp. 4908–4916. <https://doi.org/10.1063/1.1659873>
 23. Paula K.T., Dutta N.S., Almeida J.M., Nolasco L.K., Andrade M.B., Arnold C.B., Mendonça C.R. Femtosecond laser induced damage threshold incubation and oxidation in As₂S₃ and As₂Se₃ thin films. *Applied Surface Science*, 2024, vol. 654, pp. 159449. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159449>
 24. Libenson M.N., Shandybina G.D., Shakhmin A.L. Chemical analysis of products obtained by nanosecond laser ablation. *Technical Physics*, 2000, vol. 45, no. 9, pp. 1219–1222. <https://doi.org/10.1134/1.1318114>
 25. Gornushkin I.B., Veiko V.P., Karlagina Yu.Yu., Samokhvalov A.A., Polyakov D.S. Equilibrium model of titanium laser induced plasma in air with reverse deposition of titanium oxides. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2022, vol. 193, pp. 106449. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106449>

Авторы

Шамова Александра Андреевна — кандидат физико-математических наук, ассистент, младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57103706700](https://orcid.org/0000-0001-8728-260X), <https://orcid.org/0000-0001-8728-260X>, aashamova@itmo.ru

Поляков Дмитрий Сергеевич — кандидат физико-математических наук, ассистент, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57212832118](https://orcid.org/0000-0002-6240-4057), <https://orcid.org/0000-0002-6240-4057>, polyakovdmitry1988@gmail.com

Долгополов Артур Джуракулович — ассистент, инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58637797100](https://orcid.org/0000-0002-9548-791X), <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>, addolpopolov@itmo.ru

Панькин Дмитрий Васильевич — кандидат физико-математических наук, специалист, Санкт-Петербургский государственный университет, Научный парк, Ресурсный центр «Оптические и лазерные методы исследования вещества», Санкт-Петербург, Петергоф, 198504, Российская Федерация, [sc 57190487236](https://orcid.org/0000-0003-3114-3410), <https://orcid.org/0000-0003-3114-3410>, dmitrii.pankin@spbu.ru

Шандыбина Галина Дмитриевна — кандидат физико-математических наук, доцент, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6602435275](https://orcid.org/0000-0003-3501-1925), <https://orcid.org/0000-0003-3501-1925>, corchand@gmail.com

Authors

Alexandra A. Shamova — PhD (Physics & Mathematics), Assistant, Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57103706700](https://orcid.org/0000-0001-8728-260X), <https://orcid.org/0000-0001-8728-260X>, aashamova@itmo.ru

Dmitry S. Polyakov — PhD (Physics & Mathematics), Assistant, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57212832118](https://orcid.org/0000-0002-6240-4057), <https://orcid.org/0000-0002-6240-4057>, polyakovdmitry1988@gmail.com

Arthur D. Dolgoplov — Assistant, Engineer-Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58637797100](https://orcid.org/0000-0002-9548-791X), <https://orcid.org/0000-0002-9548-791X>, addolpopolov@itmo.ru

Dmitrii V. Pankin — PhD (Physics & Mathematics), Specialist, St. Petersburg State University, Research Park, Center for optical and laser materials research, Saint Petersburg, Peterhof, 198504, Russian Federation, [sc 57190487236](https://orcid.org/0000-0003-3114-3410), <https://orcid.org/0000-0003-3114-3410>, dmitrii.pankin@spbu.ru

Galina D. Shandybina — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6602435275](https://orcid.org/0000-0003-3501-1925), <https://orcid.org/0000-0003-3501-1925>, corchand@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.07.2025
Одобрена после рецензирования 25.09.2025
Принята к печати 12.11.2025

Received 31.07.2025
Approved after reviewing 25.09.2025
Accepted 12.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»