

УДК 544.032.65

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ
МОДИФИКАЦИИ И АБЛЯЦИИ ОБЪЁМНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЁКОЛ И
ТОНКИХ ПЛЁНОК НА ОСНОВЕ As_2Se_3**

Голубков В.В. (ИТМО), Долгополов А.Д. (ИТМО), Поляков Д.С. (ИТМО)

**Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Шамова А.А.
(ИТМО)**

**Научный консультант – кандидат физико-математических наук, доцент
Шандыбина Г.Д. (ИТМО)**

Введение. Объёмные и тонкоплёночные халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) являются перспективными материалами для оптики и фотоники благодаря высокому показателю преломления и хорошему пропусканию в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, а также возможности быстрых и обратимых фазовых переходов. ХСП находят применение в биосенсорах, датчиках температуры, перезаписываемых оптических запоминающих устройствах и др. Вследствие высокой оптической нелинейности ХСП могут использоваться для создания лазерных волоконных усилителей.

Современными тенденциями в разработке оптических и фотонных устройств является миниатюризация компонентов и функционализация поверхности материалов с использованием простых стратегий обработки. Одним из многообещающих способов для решения подобных задач является использование мощного фемтосекундного лазерного излучения, позволяющего осуществлять быструю и высокоточную обработку материалов. Фемтосекундная лазерная модификация ХСП открыла широкие возможности для микро- и наноструктурирования поверхности, приводящего к возникновению у них новых функциональных свойств. Однако на сегодняшний день детальная картина формирования периодических структур на поверхности ХСП под действием фемтосекундного излучения отсутствует, что затрудняет внедрение лазерной технологии управления морфологией поверхности в промышленность [1, 2]. Кроме того, продолжаются исследования механизмов лазерного повреждения ХСП при высоких интенсивностях излучения, характерных для фемтосекундных лазерных режимов, в том числе с целью предотвращения загрязнения окружающей среды ядовитыми компонентами ХСП (например, мышьяком) [3].

В работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования процессов абляции и модификации объёмного и тонкоплёночного селенида мышьяка As_2Se_3 при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов видимого и ближнего ИК диапазонов в зависимости от их энергии, количества и частоты следования.

Основная часть. В работе используются неполированные образцы селенида мышьяка As_2Se_3 толщиной ~ 3 мм и тонкие плёнки As_2Se_3 толщиной ~ 500 нм. Обработка образцов проводится в воздушной атмосфере при нормальном падении линейно поляризованного излучения фемтосекундного волоконного лазера «ANTAUS-20W-20u/1M» (длины волн излучения – 515 нм и 1030 нм, длительность импульса – 224 фс, частота следования импульсов – до 1 МГц). Измерение средней мощности/энергии лазерного излучения проводится с помощью измерителя «Gentec-EO SOLO2». Для анализа и обработки изображений, полученных с помощью цифрового оптического микроскопа «Axio Imager A1m», используется программа «ZEN lite». Химический состав облучённых объёмных образцов исследован методом рамановской спектроскопии в ресурсном центре СПбГУ «Оптические и лазерные методы исследования вещества».

Экспериментально определены пороги абляции и модификации халькогенидных плёнок As_2Se_3 фемтосекундными лазерными импульсами при частоте следования 10 Гц. Установлено, что порог абляции плёнки на длине волны 1030 нм в 1.5 раза меньше порога на длине волны 515 нм. При многоимпульсном фемтосекундном лазерном воздействии на плёнки проявляется

инкубационный эффект. На поверхности плёнок As_2Se_3 начиная с воздействия одного фемтосекундного лазерного импульса ближнего ИК диапазона при плотностях энергии излучения 0.6 ± 0.1 Дж/см² сформированы микроструктуры с низкой пространственной частотой (LSFL типа), ориентированные параллельно вектору поляризации и сохраняющиеся с дальнейшим ростом количества и энергии импульсов вплоть до образования сквозного отверстия. Выполнены оценки нелинейной динамики диэлектрической проницаемости в фемтовозбужденном халькогенидном полупроводнике As_2Se_3 на различных длинах волн.

На неполированной поверхности объёмного халькогенидного стекла As_2Se_3 сформированы массивы кратеров при облучении разным количеством фемтосекундных лазерных импульсов видимого диапазона с различной энергией в широком диапазоне частот их следования (10 Гц – 1 МГц). Экспериментально определены пороги фемтосекундной лазерной абляции образца в зависимости от количества лазерных импульсов и частоты их следования. Показано, что при повышении частоты следования импульсов до 1 МГц (количество импульсов – 1000) образование кратеров сопровождается факелом и интенсивным обратным осаждением продуктов испарения. Анализ спектров комбинационного рассеяния показал наличие в осаждённых продуктах аморфного селена, кристаллов редкого и ядовитого минерала арсенолита (оксид мышьяка As_2O_3). На основании приблизительных оценок накопительного нагрева представлена картина парофазных химических реакций разложения/окисления, сопровождающих многоимпульсную абляцию объёмного халькогенидного стекла As_2Se_3 в фемтосекундном режиме.

Выводы. Установлены пороги фемтосекундной лазерной модификации/абляции тонких халькогенидных плёнок As_2Se_3 . Впервые получены микроструктуры с низкой пространственной частотой на поверхности плёнок As_2Se_3 , ориентированные параллельно вектору поляризации, что открывает широкие перспективы для создания поляризационно-чувствительных оптических элементов инфракрасной фотоники. При лазерной абляции неполированного объёмного халькогенидного стекла As_2Se_3 фемтосекундными импульсами с мегагерцовой частотой следования в продуктах осаждения помимо аморфного Se впервые обнаружены кристаллы арсенолита As_2O_3 . Представлена картина парофазных химических реакций разложения/окисления. Результаты могут быть полезны для разработки различных оптических систем с высокой выходной мощностью лазерного излучения, изготовленных на основе халькогенидных стёкол.

Список использованных источников:

1. Yu X., Qi D., Wang H., Zhang Y., Wang L., Zhang Z., Dai S., Shen X., Zhang P., Xu Y. In situ and ex-situ physical scenario of the femtosecond laser-induced periodic surface structures // Optics Express. – 2019. – Vol. 27(7). – P. 10087-10097.
2. Shuleiko D., Zobotnov S., Sokolovskaya O., Poliakov M., Volkova L., Kunkel T., Kuzmin E., Danilov P., Kudryashov S., Pepelayev D., Kozyukhin D., Golovan L., Kashkarov P. Hierarchical Surface Structures and Large-Area Nanoscale Gratings in As_2S_3 and As_2Se_3 Films Irradiated with Femtosecond Laser Pulses // Materials. – 2023. – Vol. 16(13). – P. 4524.
3. You C., Dai S., Zhang P., Xu Y., Wang Y., Xu D., Wang R. Mid-infrared femtosecond laser-induced damages in As_2S_3 and As_2Se_3 chalcogenide glasses // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7(1). – P. 6497.