

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ  
И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 538.975

ВЛИЯНИЕ БЕСКИСЛОРОДНОЙ СРЕДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПЛЕНОК ПРИ ЛАЗЕРНОЙ  
МОДИФИКАЦИИ БЛИЖНИМ-ИК ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2025 г. А. А. Ольхова<sup>а</sup>, \*, П. П. Омельченко<sup>а</sup>, Б. Г. Шульга<sup>а</sup>,  
А. А. Патрикесова<sup>а</sup>, М. А. Дубкова<sup>а</sup>, М. М. Сергеев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

\*E-mail: olkhova.a.a@mail.ru

Поступила в редакцию 05.06.2023 г.

После доработки 24.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

В работе исследованы особенности модификации халькогенидных пленок PbSe в результате лазерной обработки с использованием различных режимов облучения наносекундными импульсами в условиях бескислородной среды. Были исследованы изменения оптических свойств пленок после лазерного облучения и модификации их структуры в атмосфере азота. Показано, что наличие азотной среды существенно не влияет на оптические характеристики пленок, получаемых в результате лазерной модификации с длиной волны падающего излучения 1064 нм. Данные результаты свидетельствуют об отсутствие необходимости использования бескислородной среды в процессе модификации чувствительных детекторов. Полученные экспериментальные данные являются основой для расширения полученных знаний по лазерной модификации структуры полупроводниковых халькогенидных пленок, а также выявления взаимосвязей между оптическими характеристиками материала до и после лазерного воздействия. Результаты исследования могут быть использованы для решения прикладных задач, связанных с изготовлением фотодетекторов в устройствах газового и биоанализа, фотовольтаики и оптоэлектроники.

**Ключевые слова:** пленки PbSe, лазерная модификация, оптические характеристики, термообработка, наносекундные импульсы

**DOI:** 10.56304/S207956292405035X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время люди активно занимаются добычей, обработкой и использованием газа, нефти и других полезных ископаемых. В связи с масштабным использованием продуктов нефтепереработки таких как: высококачественный бензин, дизельное топливо, авиационный керосин, ракетное топливо, моторные масла, мазут, предприятия нуждаются в эффективной системе своевременного обнаружения утечек данных материалов и их паров, так как они являются легковоспламенямыми и несут опасность для жизни людей и работоспособности производств. Для обнаружения газов используют газоанализаторы, детектирующим элементом в которых являются халькогенидные пленки [1]. Выбор подобных пленок обусловлен наличием пиков поглощения многих промышленных и природных газов в ИК области спектра с длиной волны 3–6 мкм [1, 2]. Благодаря высокому поглощению халькогенидных пленок в ИК диапазоне они часто используются в роли фотодетекторов [3]. Благодаря своим особым

физическим свойствам соли свинца, такие как селенид свинца (PbSe) и сульфид свинца (PbS) стали первыми полупроводниковыми материалами, используемыми в качестве ИК детекторов и в настоящее время они являются ведущими материалами для создания ИК детекторов, работающих в диапазоне 1–5 мкм [4]. Селенид свинца является материалом с прямой запрещенной зоной. Ширина запрещенной зоны для тонких пленок PbSe при комнатной температуре составляет 0.27 эВ [2].

В настоящее время одним из ведущих методов сенсибилизации тонкой пленки селенида свинца для дальнейшего использования в газоанализаторе является отжиг в печи [2, 5]. Из-за трудозатратности и большого процента брака в данном методе в последнее время развивается методология обработки тонких пленок селенида свинца лазерным излучением [3, 6]. При обжиге в печи трудно контролировать весь процесс и, как следствие, точный химический состав и структуру полученного материала. При обработке пленок PbSe лазерным излучением открывается возможность

более контролируемого изменения структуры материала, его оптических свойств и химического состава. Также, можно контролировать ширину запрещенной зоны материала и создавать пленки с заданной шириной запрещенной зоны [3, 5]. Появляется возможность сузить спектр поглощения пленки для определенного газа. Данный метод уже показал свою эффективность при сравнении оптических и электрических свойств пленок, полученных при помощи лазерной модификации и отжига в печи. Но в обоих из этих методов происходит окисление материала, что впоследствии влияет на сопротивление и электрические свойства материала [5]. Авторы изучили образующиеся оксиды  $PbSeO_3$  и  $PbSeO_4$  в процессе окисления материала и выявили, что их ширина запрещенной зоны составляет соответственно 2.88 и 2.3 эВ, что на порядок выше, чем у исходного материала [7]. В качестве решения проблемы окисления  $PbSe$  пленка обрабатывалась в газовой камере под непрерывным потоком аргона [6, 7]. Образование оксида при обработке в воздушной среде и его предположительное влияние на электрические характеристики ставит вопрос об обработке тонких пленок  $PbSe$  в бескислородной среде. В частности, обработку в вакуумной камере под непрерывным потоком азота.

В данном исследовании тонкие пленки  $PbSe$  были помещены в герметичную камеру, заполненную азотом, после чего было проведено облучение наносекундными лазерными импульсами. Оптические свойства полученного образца были сопоставлены со свойствами необработанной пленки, обработанной пленки методом отжига в печи и пленки, после лазерного облучения в воздушной среде.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Используемые в работе пленки были созданы методом вакуумно-термического напыления на плоскопараллельной подложке из покровного стекла толщиной 0.2 мм. Образцы пленки изготовлены компанией ООО “Оптосенс”. Лазерная модификация производилась наносекундным лазерным излучением волоконного лазера на базе комплекса “Минимаркер-2” (ООО “Лазерный центр”, Россия) с длинной волны 1064 нм. Для сокращения содержания воздуха до минимального значения была использована герметичная камера объемом  $\sim 205$  см<sup>3</sup>, имеющая оптическое окно из кварцевого стекла. Сжатый газ  $N_2$  подавался через входной клапан камеры.

В качестве предварительной оценки оптических свойств были использованы результаты оптической микроскопии в светлом и темном поле на пропускание и отражение с помощью микроскопа Carl Zeiss Axio Imager. Для исследования отражения и пропускания пленок в диапазоне от

380 до 900 нм был использован спектрофотометр МСФУ-К Ю-30.54.072, ЛОМО.

Поверхность пленок оценивалась с помощью просвечивающей электронной микроскопии, а также с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Для оценки поверхности был использован сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения Merlin Zeiss.

## Лазерная модификация

Лазерная обработка осуществлялась при помощи наносекундных лазерных импульсов волоконного иттербийового лазера с длиной волны 1064 нм. Движение пятна по заданной траектории осуществлялось с использованием двухзеркального гальванометрического сканатора. После зеркал сканатора лазерный пучок фокусировался F-Θ линзой с полем обработки 100 × 100 мм на поверхности пленки, помещенной в вакуумную камеру объемом 205 см<sup>3</sup>. Давление внутри камеры в ходе эксперимента составляло 7–10 МПа. Обработка проводилась в расфокусированном пучке.

Для использованных в работе режимов обработки были рассчитаны плотность мощности и плотность энергии по следующим формулам:

$$q = 2 \cdot \frac{P_p}{S} = 2 \cdot \frac{4P_c}{\pi d_0^2 \cdot \tau_p \cdot f_p} \quad \text{плотность мощности;}$$

$$W = q \cdot \frac{d_0}{\vartheta} \quad \text{плотность энергии, где } d_0 \text{ — Диаметр лазерного пятна, } \tau_p \text{ — Длительность импульсов, } f_p \text{ — частота следования импульсов, } \vartheta \text{ — Скорость сканирования.}$$

Обработка в режиме 2 проходила за два сканирования с разными значениями плотности мощности (табл. 1). При этом присутствовало перекрытие лазерных треков 60%. Обработка в режиме 4 также проходила в два прохода при полном перекрытии лазерных треков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Лазерная модификация

Подробный анализ структуры исходных пленок  $PbSe$  и образцов, подвергавшихся тепловой обработке в печи исследовался авторами работы ранее [8].

Используемая в работе длина волны лазерного излучения попадает в область собственного поглощения пленок  $PbSe$ , что в свою очередь обеспечивает высокое поглощение падающего лазерного излучения. При всех рассмотренных режимах обработки наблюдалось образование прозрачного оксида свинца в зоне воздействия лазерного излучения. Вследствие воздействия наносекундны-

**Таблица 1.** Таблица режимов обработки образца

№ режима	Скорость сканирования, мм/с	Частота следования импульсов, кГц	Длительность импульсов, нс	Плотность мощности, МВт/см <sup>2</sup>	Плотность энергии, кДж/см <sup>2</sup>
1	15	90	50	15.72	31.44
2	10	40	14	101	202
	15	90	50	27.1	54
3	10	40	14	90.9	1.82
4	10	40	14	101	202
	15	90	50	27.1	54

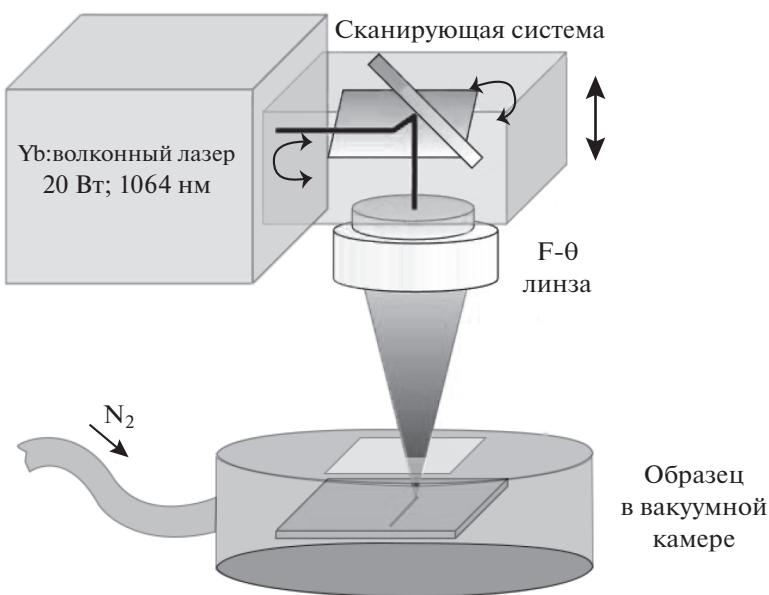
ми импульсами, в области лазерного пятна формировался тепловой источник с высоким градиентом температуры. Резкое нагревание/охлаждение материала приводило к возникновению избыточных напряжений, что служило причиной образования трещин. Также нагрев образца приводил к размягчению, перераспределению и рекристаллизации материала.

К широко распространенным фотоиндуцированным эффектам в халькогенидных материалах относятся потемнение и просветление. В работе [8] авторы отмечали возникновение потемнения при меньших плотностях энергии лазерного излучения и просветления при больших. Во время лазерной обработки оптические характеристики образца непостоянны, в связи с этим не постоянна и доля поглощенной энергии лазерного излучения. В начале воздействия пленка темнеет, что приводит к росту поглощения и доли поглощен-

ной энергии. Затем происходит просветление образца в зоне воздействия, что приводит к уменьшению поглощенной доли лазерного излучения.

При модификации пленки в режиме 1 также отмечалось образование периодических структур с периодом около 700 нм. Данные структуры представляют собой чередующиеся области с наночастицами разного размера (рис. 2). Авторы предполагают, что данные сферические структуры являются скоплением наночастиц в оксидной фазе. Вопрос формирования подобных структур и их влияние на оптические свойства еще предстоит исследовать детальнее.

Изображение FESEM пленки после лазерной модификации в режиме 1 показано на рис. 2. Изображения ясно показывают возникновение оксида после лазерной модификации, а также значительное уменьшение в составе пленки Se. Также отме-

**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для лазерной обработки халькогенидных пленок в среде N<sub>2</sub>.

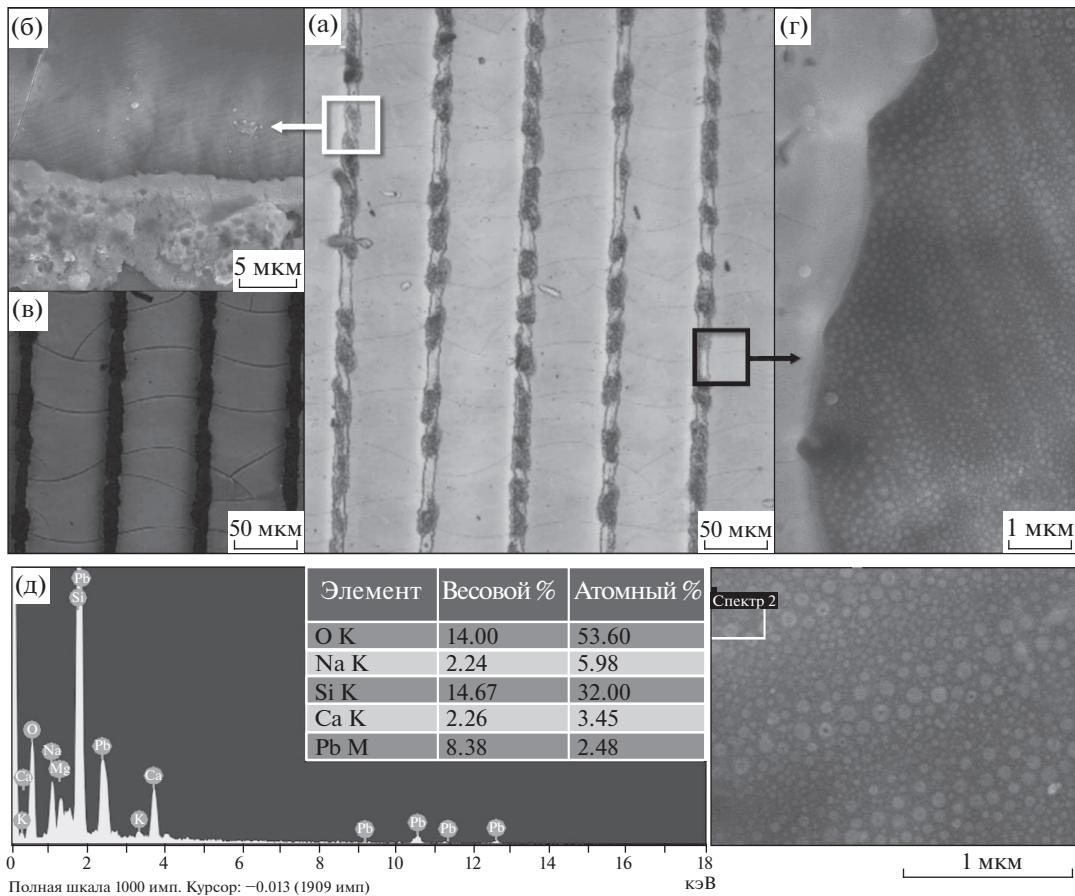


Рис. 2. Снимки обработанного в режиме 1 участка пленки PbSe, полученные с помощью оптической микроскопии в отраженном (а) и проходящем (в) свете светлого поля. Снимки обработанного в режиме просветления участка пленки PbSe, полученные с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (б, г). Результаты EDX (д).

чается наличие элементов, характерных для подложки в виде покровного стекла.

В случае обработки пленки PbSe лазерным излучением с большей плотностью энергии в режиме частичного перекрытия (режим 2) также наблюдалось образование прозрачного оксида и трещин, сформированных перпендикулярно трекам. В пределах трека аналогично отмечалось возникновение периодических структур (рис. 3). На обработанной поверхности формировались наночастицы. Проанализировав данные, приведенные на изображении FESEM (рис. 3) можно предположить, что данные образования являются наночастицами свинца.

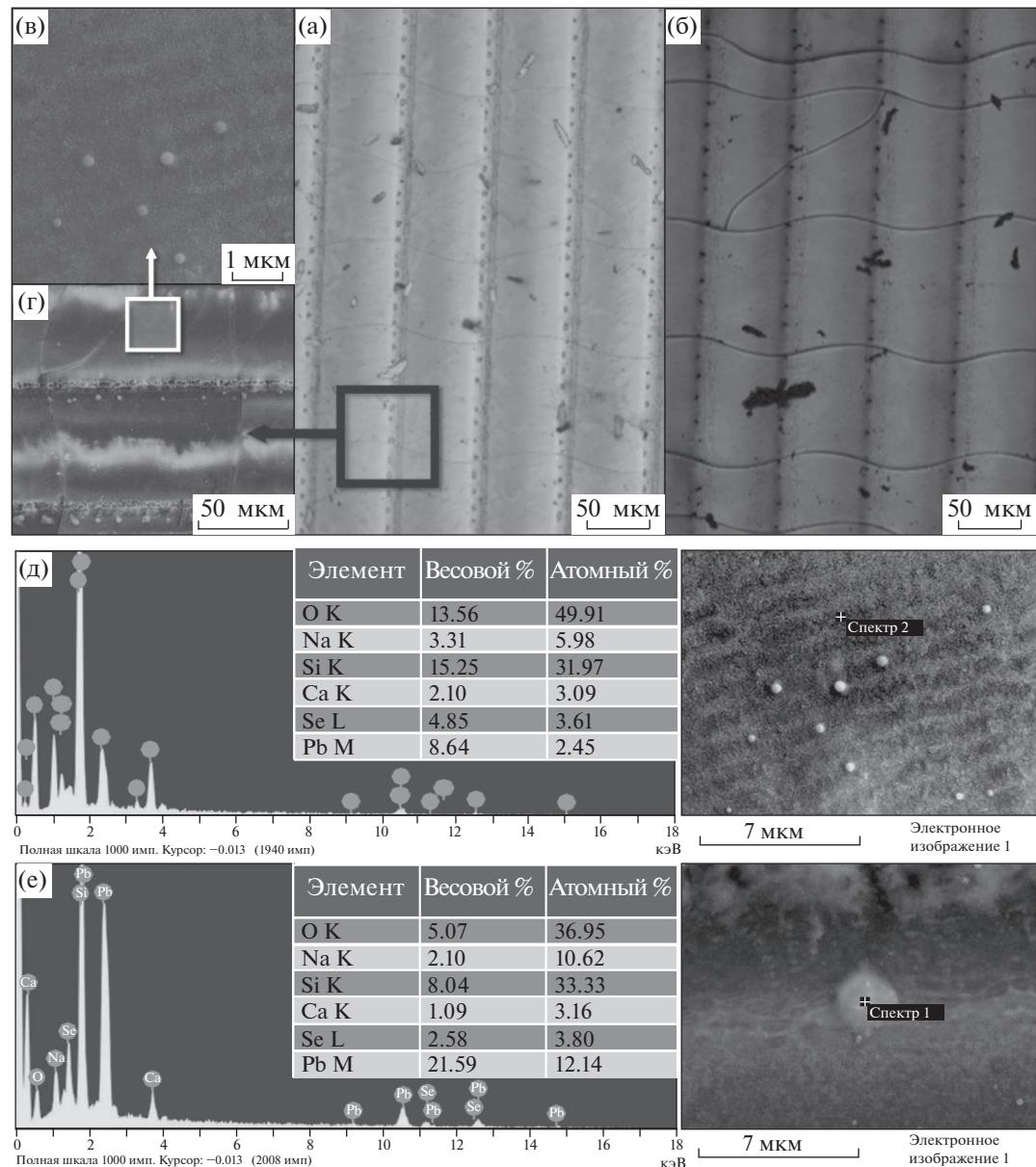
При дальнейшем уменьшении скорости сканирования (режим 3), в областях, подвергшихся воздействию лазерных импульсов, наблюдалась анизотропия оптических свойств при оптической микроскопии в скрещенных поляризаторах. В отличие от модификации в режиме 1, в данном случае периодические структуры не формировались, при этом наночастицы могли переплавляться и формировать продолговатые структуры (рис. 4). Та-

кой результат связан с большей энергией излучения лазерного пучка и, следовательно, нагревом пленки до более высокой температуры. Сформированные структуры также могли оказать влияние на оптические характеристики образца. Уменьшение в составе свинца и селена свидетельствует об уменьшении толщины пленки (рис. 4).

Повторное сканирование лазерным пятном с полным перекрытием, когда второе сканирование полностью накладывалось на первое (режим 4) приводило к увеличению доли оксида, что сопровождалось большим просветлением материала и наблюдалось при оптической микроскопии в светодиодном поле проходящего света (рис. 5). Аналогично, наблюдалось формирование периодических структур в оксидной фазе, но отличных от периодических структур, рассмотренных ранее и полученных в режиме 1.

#### Оптическая характеристика

На рис. 6 изображены спектры отражения образцов, прошедших различные виды обработки.



**Рис. 3.** Снимки обработанного в режиме 2 участка пленки PbSe, полученные с помощью оптической микроскопии в отраженном (а) и проходящем (б) свете светлого поля. Снимки обработанного в режиме просветления с частичным наложением участка пленки PbSe, полученные с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (в, г). Результаты EDX (д, е).

Образцы, подвергшиеся тепловой обработке в печи во всем видимом спектральном диапазоне обладали наименьшим отражением, около 10%, что является следствием возникновения прозрачного оксида на поверхности. Также в результате лазерной обработки наблюдается значительное падение отражения в видимой области спектра области спектра. Наименьшим изменением отражения относительно исходной пленки обладал образец, обработанный в режиме просветления, у которого наблюдалась анизотропия оптических

свойств (режим 3), его отражение составило от 37 до 25%, что в 1.1–1.6 раза меньше отражения исходной пленки. Наибольшим изменением отражения относительно исходной пленки обладал образец после лазерной модификации в режиме просветления с частичным наложением (режим 2), что может быть связано с частичным перекрытием лазерных треков вдоль оси сканирования. Отражение образца, обработанного в режиме 2 составило 8–15%, что в 2–5 раз меньше отражения пленки до обработки. В случае лазерной модифи-

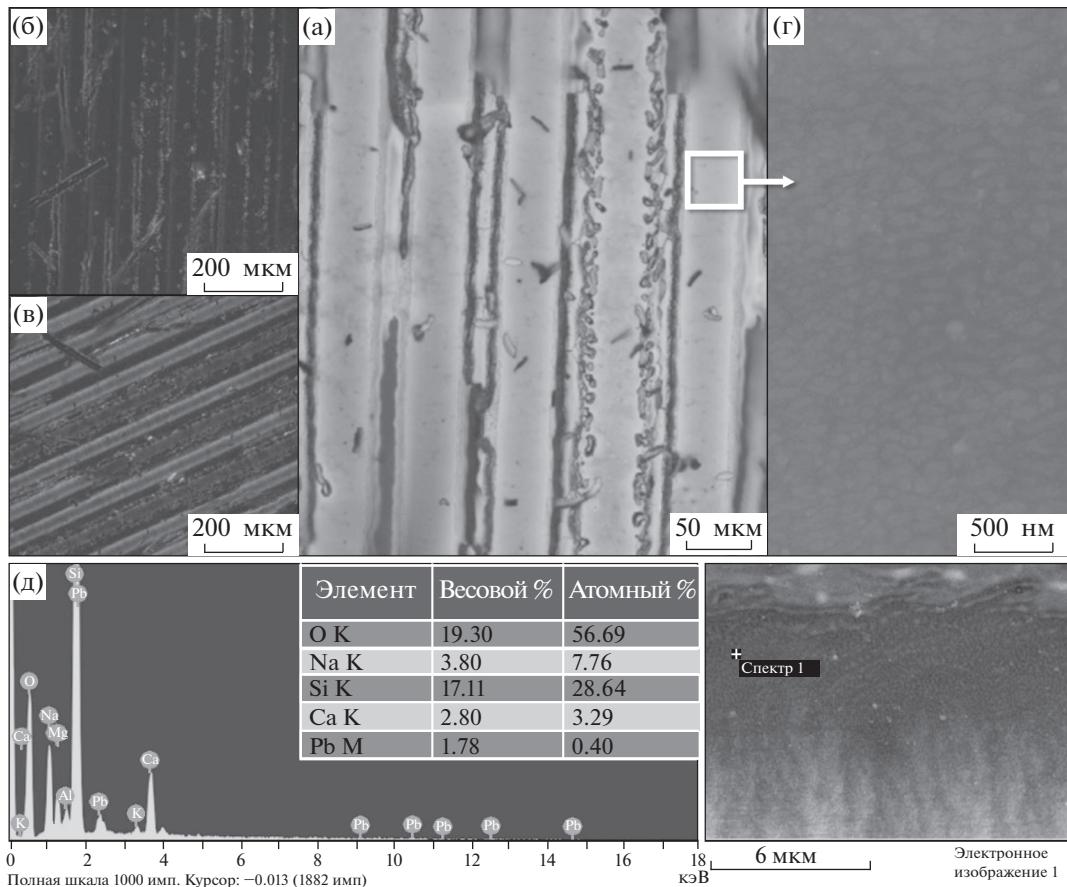
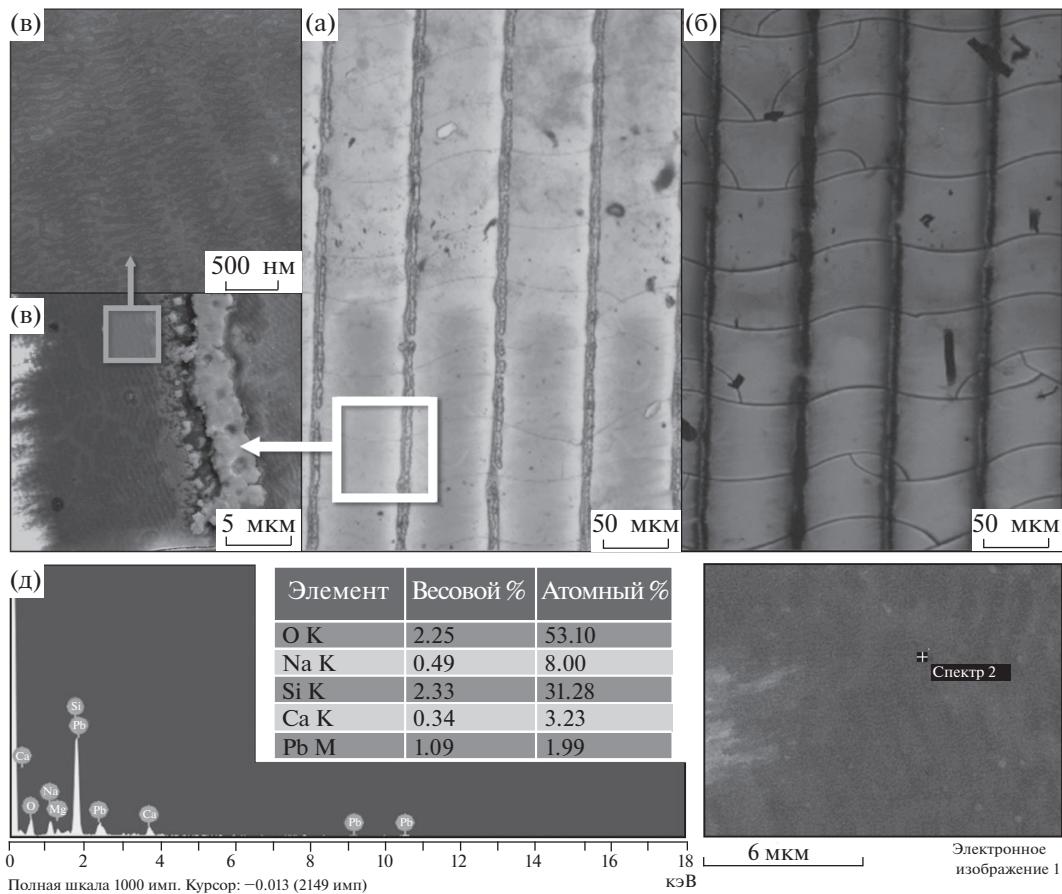


Рис. 4. Снимки обработанного в режиме 3 участка пленки PbSe, полученные с помощью оптической микроскопии в отраженном свете светлого поля (а) и в скрещенных поляризаторах (б, в). Снимки обработанного в режиме просветления участка пленки PbSe, полученные с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (г). Результаты EDX (д).

кации оптических свойств пленок PbSe в режиме просветления в кислородосодержащей среде [8] отражение образцов снижалось незначительно, по сравнению с образцами, полученными в режимах 1, 2 и 4. Причиной такого результата может быть наличие газа  $N_2$  при обработке в вакуумной камере, а также использование режимов с большей плотностью энергией в данном исследовании.

Исходная пленка, не подвергавшаяся тепловой обработке, отражала и поглощала падающее излучение, не пропуская его. После различных методов обработки минимальным пропусканием обладал образец после тепловой обработки в печи (рис. 7). По сравнению с исходной пленкой пропускание увеличилось гораздо больше, чем уменьшалось отражение, то есть пленки становились более прозрачными, что может быть следствием возникновения прозрачной оксидной фазы в области лазерного воздействия (рис. 2–5). Наименьшим пропусканием в видимой области спектра относительно образцов, подвергнутых лазерной обработке, обладали пленки после мо-

дификации в режимах 1 и 3, при этом максимальное пропускание среди всех исследуемых образцов было характерно для пленки после лазерного воздействия в режиме 4. Также в результате лазерной обработке с частичным (режим 2) и полным (режим 4) перекрытием пленки обладали схожим пропусканием, большим чем при обработке в режиме 1 или 3, так как плотность мощности лазерного воздействия в режимах 2 и 4 была больше, что способствовало увеличению оксидной фазы и истончению пленки, тем самым повысив пропускание модифицированных областей пленки. В работе авторов [8] при лазерном воздействии на образцы в режиме просветления их пропускание практически не изменилось, однако в данном исследовании лазерная обработка во всех четырех режимах способствовала росту пропускания, превосходящему отражение, что может быть связано с обработкой пленок излучением с большей плотностью энергии, а также с использованием режимов с частичным и полным перекрытием лазерного пятна вдоль области сканирования.



**Рис. 5.** Снимки обработанного в режиме 4 участка пленки PbSe, полученные с помощью оптической микроскопии в отраженном (а) и проходящем (б) свете светлого поля. Снимки обработанного в режиме просветления с полным наложением участка пленки PbSe, полученные с помощью детектора вторичных электронов СЭМ (в, г). Результаты EDX (д).

#### Расчет оптических констант

Полученные зависимости оптических характеристик далее использовались для определения коэффициента поглощения  $\alpha$ , коэффициента экстинкции  $k$  и показателя преломления  $n$  [9]. Коэффициент поглощения рассчитывался по выражению:

$$\alpha = A/d,$$

где  $A$  – поглощение,  $d$  – толщина пленки ( $d \approx 1$  мкм). Коэффициент экстинкции  $k$  определялся через  $\alpha$  следующим образом:

$$k = \alpha\lambda/(4\pi),$$

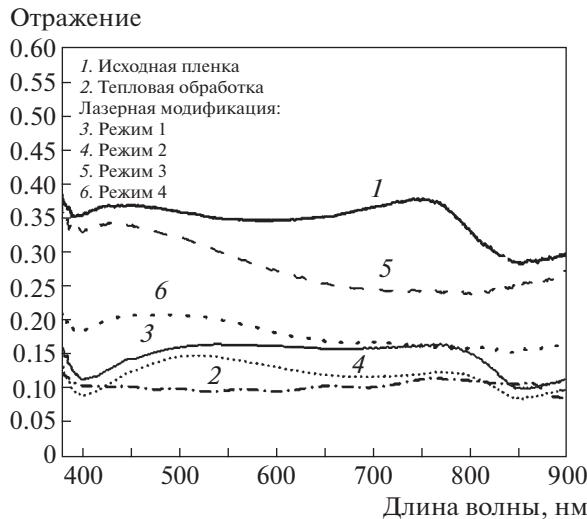
где  $\lambda$  – длина волны. Значение  $n$  определялось через отражательную способность  $R$  из следующего выражения [9]:

$$n = [(1 + R) + \\ + \{(1 + R)^2 - (1 - R)^2(1 + k^2)\}^{0.5}]/(1 - R).$$

Данное выражение применимо в случае, если влиянием подложки можно пренебречь. Выражение было выведено, как решение квадратного уравнения.

$$R = [(n - 1)^2 + k^2]/(n + 1)^2 + k^2].$$

Результаты расчета оптических констант для исходного и модифицированного образца представлены на рис. 8. В результате лазерной обработки наблюдалось уменьшение коэффициента поглощения вследствие роста пропускания модифицированной области. Так как коэффициент экстинкции прямо пропорционален коэффициенту поглощения, он претерпевал аналогичные изменения. Наименьшее значение показателя преломления наблюдалось у образцов после тепловой обработки в печи и после лазерной модификации в режиме 2. В результате фототермического воздействия на материал пленки происходило смещение границ валентной зоны и зоны проводимости, что оказывало влияние на оптические свойства.



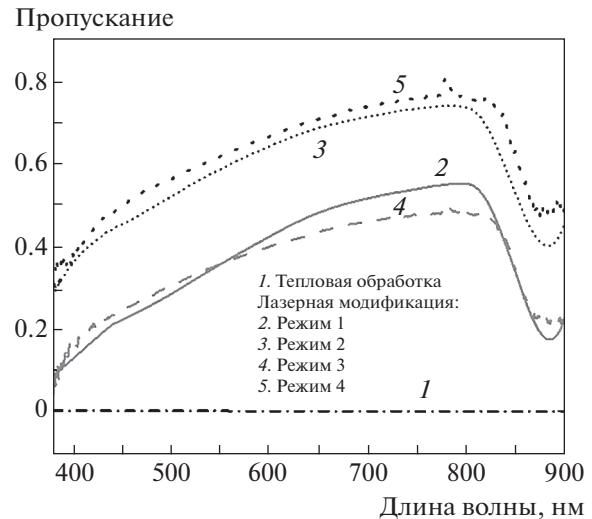
**Рис. 6.** Спектры отражения, полученные для образцов, подвергавшихся различной обработке: исходный образец (кривая 1), образец после тепловой обработки (кривая 2), образец после лазерной модификации в режиме просветления без наложения (кривая 3), образец после лазерной модификации в режиме просветления с частичным наложением (кривая 4), образец после лазерной модификации в режиме просветления с анизотропией оптических свойств (кривая 5), образец после лазерной модификации в режиме просветления с полным наложением (кривая 6).

ства, рассмотренных выше. В работе [8], где лазерная модификация пленок PbSe осуществлялась аналогичным источником лазерного излучения, также наблюдалось уменьшение показателя преломления. Так как вклад пропускания был не значительным, наблюдалось увеличение коэффициента поглощения и коэффициента экстинкции, в отличие от результатов данной работы авторов.

С помощью измеренных оптических характеристик также была определена ширина запрещенной зоны  $E_g$  методом Таука [10]. Энергия запрещенной зоны определялась до и после модификации пленок селенида свинца графическим методом по соотношению

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^\gamma,$$

где  $h\nu$  – энергия фотонов;  $B$  – постоянная Таука;  $\gamma$  – коэффициент усиления для всех возможных переходов в электронной системе. Коэффициент  $\gamma$  в данном случае составляет  $1/2$ , что характерно для кристаллических твердых тел. Полученные результаты представлены на рис. 9. После тепловой обработки в печи происходило уменьшение ширины запрещенной зоны до  $1.27$  эВ, что согласуется с ранее опубликованными результатами [4, 10]. После обработки наносекундными лазерными импульсами наблюдалось увеличение шири-



**Рис. 7.** Спектры пропускания, полученные для образцов, подвергавшихся различной обработке: образец после тепловой обработки (кривая 1), образец после лазерной модификации в режиме просветления без наложения (кривая 2), образец после лазерной модификации в режиме просветления с частичным наложением (кривая 3), образец после лазерной модификации в режиме просветления с анизотропией оптических свойств (кривая 4), образец после лазерной модификации в режиме просветления с полным наложением (кривая 5).

ны запрещенной зоны. Максимальное значение  $E_g$  составляло  $2.83$  эВ после лазерной модификации в режиме 2. Увеличение ширины запрещенной зоны может быть связано с образованием оксида, который по своим характеристикам ближе к диэлектрику, чем исходный образец. В ранее опубликованной работе авторов [8] лазерная модификация пленок селенида свинца приводила к уменьшению ширины запрещенной зоны до  $1.45$  эВ, где также наблюдалось образование оксида. В данном случае образование прозрачного оксида происходило в большем количестве, что также отразилось на значительном росте пропускания, пре-восходящего поглощение/отражение пленки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено исследование влияние лазерной обработки импульсным излучением с длиной волны  $1064$  нм в различных режимах на изменение оптических характеристик халькогенидных пленок PbSe в условиях бескислородной среды. В результате лазерной модификации происходило изменение структуры образцов в том числе формирование периодических структур за счет размягчения, перераспределения и рекристаллизации материала. Вследствие лазерного воздействия наблюдалось уменьшение в составе пленки

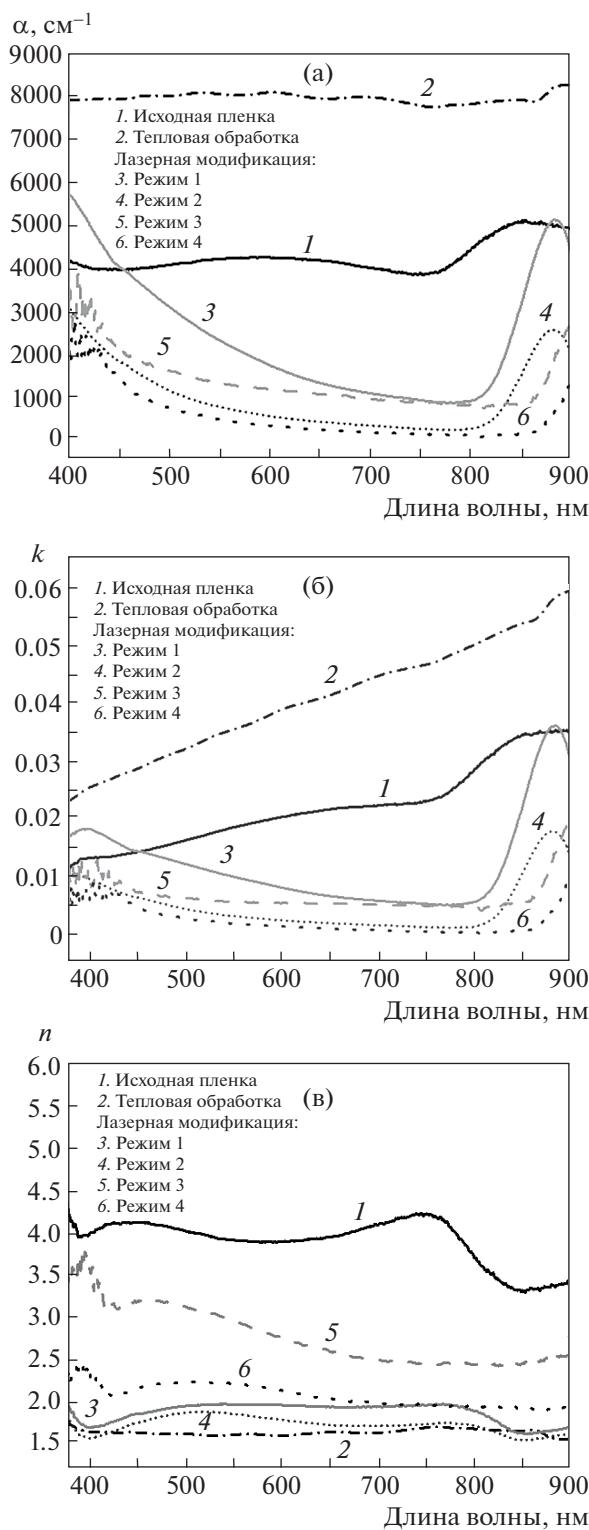


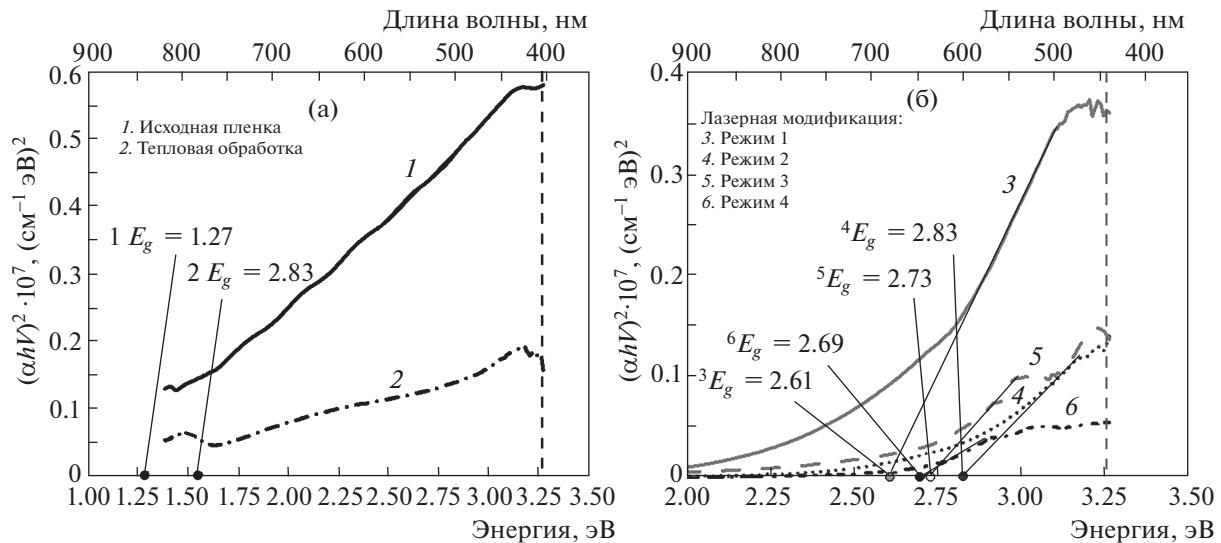
Рис. 8. Оптические характеристики пленок для необработанной пленки (кривая 1), после тепловой обработки (кривая 2), лазерная модификация в режиме 1 (кривая 3), лазерная модификация в режиме 2 (кривая 4), лазерная модификация в режиме 3 (кривая 5), лазерная модификация в режиме 4 (кривая 6): (а) коэффициент поглощения  $\alpha$ , (б) коэффициент экстинкции  $k$ , (в) показатель преломления  $n$ .

Se, а также образование оксидной фазы, более прозрачной в видимой области спектра по сравнению с исходной пленкой. Вышеперечисленные изменения морфологии и элементного состава пленки PbSe влекли за собой модификацию оптических свойств.

Лазерная модификация образцов во всех представленных режимах обеспечивала уменьшение отражения и увеличение пропускания пленки в диапазоне длин волн 400–900 нм. При этом максимальным коэффициентом поглощением 5700–1000  $\text{см}^{-1}$  обладала пленка, обработанная в режиме 1, однако при лазерной обработке пленки в кислородосодержащей среде [8], коэффициент поглощения имел большее значение около 4700–6200  $\text{см}^{-1}$ . Также значение коэффициента поглощения пленки после лазерной модификации в режиме 1 не превышало значение коэффициента поглощения пленки, прошедшей тепловую обработку в печи 8000–8300  $\text{см}^{-1}$ , что по сравнению с коэффициентом поглощения исходной пленки 4000–5000  $\text{см}^{-1}$  представляло собой существенное изменение. Уменьшение коэффициента поглощения в результате лазерной обработки происходило вследствие роста пропускания модифицированной области.

Стоит отметить, что после обработки наносекундными лазерными импульсами наблюдалось увеличение ширины запрещенной зоны, что может быть связано с образованием оксида, который по своим характеристикам ближе к диэлектрику, чем исходный образец. Максимальное значение  $E_g$  составляло 2.83 эВ после лазерной модификации в режиме 2, тем же значением  $E_g$  обладала пленка также после тепловой обработки в печи, однако, лазерная обработка в кислородосодержащей среде [8] приводила к уменьшению ширины запрещенной зоны до 1.45 эВ. Такое расхождение значений энергии запрещенной зоны пленки PbSe, подвергшейся лазерному воздействию, может быть связано с тем, что в нашем исследовании образование прозрачного оксида происходило в большем количестве, которое являлось причиной роста пропускания, превосходящего поглощение/отражение пленки.

Таким образом полученные результаты свидетельствуют об отсутствии необходимости использования бескислородной среды в процессе модификации пленок PbSe. Тем не менее данные, полученные в результате проведенной экспериментальной работы, могут служить основой для расширения знаний по лазерной модификации структуры полупроводниковых халькогенидных пленок, а также поиска закономерностей и взаимосвязи между изменениями оптических свойств пленок PbSe после лазерной обработки.



**Рис. 9.** Определение оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$  до и после модификации пленок PbSe: (а) необработанная пленка (кривая 1) и после тепловой обработки (кривая 2); (б) лазерная модификация в режиме 1 (кривая 3), лазерная модификация в режиме 2 (кривая 4), лазерная модификация в режиме 3 (кривая 5), лазерная модификация в режиме 4 (кривая 6).

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет гранта Российского Национального Фонда (проект № 23-29-10081).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Tan C.L., Mohseni H.* // *Nanophotonics*. 2018. V. 7. P. 169–197.
2. *Gupta M.C., Harrison J.T., Islam M.T.* // *Mater. Adv.* 2021. V. 2 (10). P. 3133–3160.
3. *Jang M.H. et al.* // *Appl. Opt.* 2020. V. 59 (30). P. 9409–9414.
4. *Rogalski A.* // *Opto-Electron. Rev.* 2012. V. 20. P. 279–308.
5. *Ren Y.X., Dai T.J., Luo W.B., Liu, X. Z.* // *Vacuum*. 2018. V. 149. P. 190–194.
6. *Harrison J.T., Pantoja E., Jang M.H. Gupta M.C.* // *J. Alloys Compd.* 2020. V. 849. P. 156537.
7. *Ahmed R., Gupta M.C.* Mid-infrared photoresponse of electrodeposited PbSe thin films by laser processing and sensitization // *Opt. Lasers Eng.* 2020. V. 134. P. 106299.
8. *Olkhova A.A. et al.* // *Appl. Sci.* 2023. V. 13 (4). P. 2396.
9. *Khan S.A. et al.* // *Phys. B (Amsterdam, Neth.)*. 2010. V. 405 (16). P. 3384–3390.
10. *Shyju T.S., Anandhi S., Sivakumar R., Garg S.K., Gopalakrishnan R.* // *J. Cryst. Growth*. 2012. V. 353 (1). P. 47–54.

## Influence of an Oxygen-Free Environment on the Chalcogenide Films Characteristics Upon Laser Modification by Near-IR Radiation

A. A. Olkhova<sup>1</sup>, \*, P. P. Omelchenko<sup>1</sup>, B. G. Shulga<sup>1</sup>,  
A. A. Patrikeeva<sup>1</sup>, M. A. Dubkova<sup>1</sup>, and M. M. Sergeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, St. Petersburg, 197101 Russia

\*e-mail: olkhova.a.a@mail.ru

Received June 5, 2023; revised August 24, 2023; accepted August 28, 2023

**Abstract**—In this work, the features of the PbSe chalcogenide film modification as a result of irradiation with nanosecond pulses by laser treatment using various modes in an oxygen-free environment are studied. Changes in the optical properties of the films after laser irradiation and modification of their structure in a nitrogen atmosphere were studied. It is shown that the presence of a nitrogen medium does not significantly affect the optical characteristics of films obtained as a result of laser modification with an incident radiation wavelength of 1064 nm. These results indicate that there is no need to use an oxygen-free medium in the process of modifying sensitive detectors. The obtained experimental data are the basis for expanding the knowledge gained on laser modification of the structure of semiconductor chalcogenide films, as well as revealing

the relationship between the optical characteristics of the material before and after laser exposure. The results of the study can be used to solve applied problems related to the manufacture of photodetectors in devices for gas and bioanalysis, photovoltaics and optoelectronics.

*Keywords:* PbSe films, laser modification, optical characteristics, heat treatment, nanosecond pulses