

05

## Анализ фемтосекундной модификации тонких пленок $\alpha$ - $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ методом XZ-сканирования

© И.А. Будаговский<sup>1</sup>, Д.О. Кузовков<sup>1,2,3</sup>, П.И. Лазаренко<sup>2</sup>, М.П. Смаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
119991 Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,  
124498 Зеленоград, Москва, Россия

<sup>3</sup> ГК „Лазеры и аппаратура“,  
124498 Зеленоград, Москва, Россия

e-mail: BudagovskyIA@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

В окончательной редакции 09.01.2024 г.

Принята к публикации 16.01.2024 г.

Рассмотрена светоиндуцированная модификация тонких халькогенидных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с помощью фемтосекундного лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне (1030 nm), реализуемая посредством двухкоординатного (XZ) сканирования. При смещении образца вдоль оси пучка изменялись параметры воздействующего излучения вследствие изменения размера облучаемой области, что обеспечивало последовательную смену характерных режимов модификации: от формирования периодических двухфазных поверхностных структур, кристаллизации, возникновения предаблиционных структур до абляции. Продемонстрировано, что XZ-сканирование является удобным способом как для определения необходимых для модификации пленки параметров излучения, так и для определения геометрии пучка.

**Ключевые слова:** лазерная модификация, фемтосекундные импульсы, тонкие пленки, аморфные халькогениды, оптическая микроскопия.

DOI: 10.61011/OS.2024.01.57545.7-24

### Введение

Тонкопленочные фазопеременные материалы на основе халькогенидов обладают уникальными электрическими и оптическими характеристиками, что обуславливает исследовательский и прикладной интерес к этим соединениям [1–3]. Характерным примером является тройное соединение  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  — перспективный материал, широко используемый для хранения данных, модуляции световых пучков, создания элементов микро- и нанофотоники, а также интегральной оптики [4–6]. Тонкие пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  в результате внешнего воздействия способны быстро (за десятки наносекунд) и обратимо переключаться между кристаллическим и аморфным состояниями, существенно отличающимися по своим свойствам, в частности по электропроводности, коэффициенту экстинкции, показателю преломления и т. д.

Переключение между фазовыми состояниями реализуемо различными методами (термическим, электрическим, оптическим), среди которых особое место занимает переключение лазерным пучком. Для кристаллизации аморфной поверхности требуется нагрев выше температуры кристаллизации, которая в случае  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  составляет около 130–180°C, что может быть достигнуто в результате оптического воздействия [7–9]. Для обратного процесса (индуцированной аморфизации) требуется нагрев выше температуры плавления и быстрый процесс охлаждения (около 10 ns), что возможно при

малых временах воздействия, например при облучении короткими лазерными импульсами [10–12].

При воздействии на  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  световых импульсов фемто- и пикосекундной длительности могут проявляться более сложные поверхностные процессы, приводящие, например, к образованию лазерно индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) в виде чередующихся кристаллических и аморфных линий [13–16], либо к образованию областей предаблиционной периодической модификации [15,17]. Возникновение ЛИППС обычно связывают с образованием на границе облучаемой пленки плазмон-поляритона и его интерференцией с падающим излучением [13,14,18]. Изучению процессов модификации тонкопленочных структур лазерным пучком посвящено множество работ, в которых варьируются методы формирования пленок, их состав, легирующие компоненты, наличие защитных и функциональных слоев, а также пространственные, поляризационные, энергетические характеристики воздействующего излучения. При таком широком разнообразии подходов актуальной становится возможность простым образом проводить характеристику облученных образцов с точки зрения проявления различных физических эффектов.

Как показано в работах [13,16,19], параметры фемтосекундного излучения (с длиной волны  $\lambda = 1030$  nm), приводящего к формированию перпендикулярных поляризации пучка контрастных двухфазных ЛИППС на по-

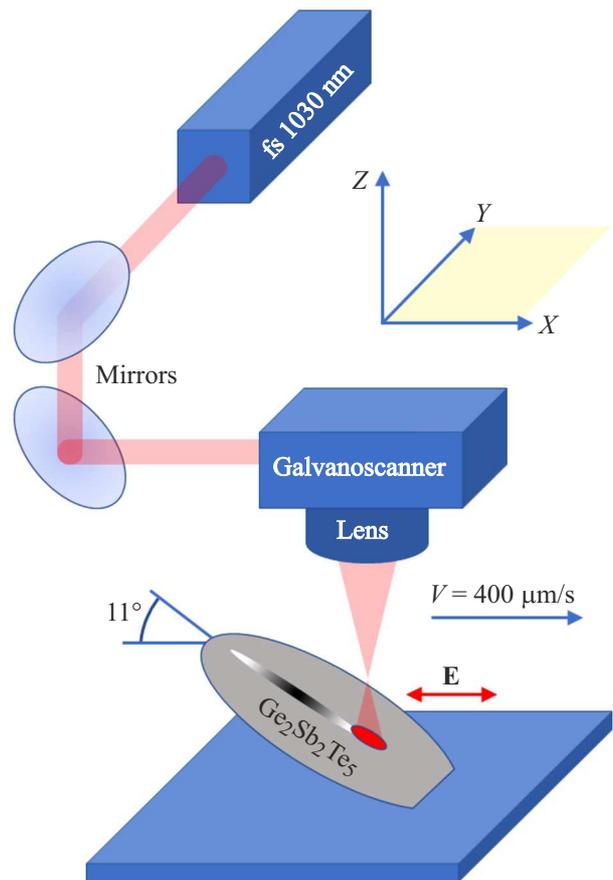
верхности пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , находятся в достаточно узком энергетическом диапазоне (максимальная плотность потока энергии  $F_{\text{max}} = 4\text{--}8 \text{ mJ/cm}^2$ ), требуют достаточно большого числа импульсов ( $> 250$ ) и мало зависят от частоты в пределах  $10\text{--}1000 \text{ kHz}$ . Такие особенности не только определяют актуальность поиска оптимальных для модификации параметров лазерного излучения, но также позволяют рассматривать процесс лазерной модификации халькогенидной пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  как некий индикатор пространственных характеристик лазерного излучения. Кристаллические и аморфные области  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  значительно отличаются показателями преломления и экстинкции, что проявляется в различном отражении от пленки в видимом диапазоне [20] и позволяет использовать оптическую микроскопию для анализа областей модификации.

Как правило, для определения параметров излучения, необходимых для появления различных режимов модификации, проводят эксперименты по записи массивов точек с варьированием величины перетяжки, энергии, длительности, частоты следования и числа импульсов, что является достаточно трудоемкой операцией. В настоящей работе мы предлагаем использовать метод двухкоординатного сканирования, при котором движение образца вдоль оси светового пучка обеспечивает изменение размера пучка, плотности энергии и числа импульсов, а движение в плоскости образца позволяет осуществить развертку и запись этих изменений в виде длинной зоны модификации. Такая запись длинного следа (long trace) демонстрирует полный набор возможных явлений лазерной модификации пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ : формируются периодические поверхностные структуры, зоны непрерывной кристаллизации, зоны преобладания структур и полной абляции. Сопоставляя пространственное распределение лазерного излучения с формой и структурой записанного следа, можно определить параметры, при которых появлялись каждая из характерных для фемтосекундной модификации  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  зон.

## Материалы и методика эксперимента

Экспериментальным образцом являлась аморфная пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  толщиной  $130 \text{ nm}$ , нанесенная на поверхность кремниевой пластины толщиной  $470 \text{ }\mu\text{m}$  методом магнетронного распыления поликристаллической мишени поверх слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной  $1 \text{ }\mu\text{m}$ . Температурный диапазон перехода из аморфного в кристаллическое состояние измеряли по температурной зависимости удельного сопротивления. Было установлено, что фазовый переход происходит в пределах от  $160^\circ\text{C}$  до  $180^\circ\text{C}$ .

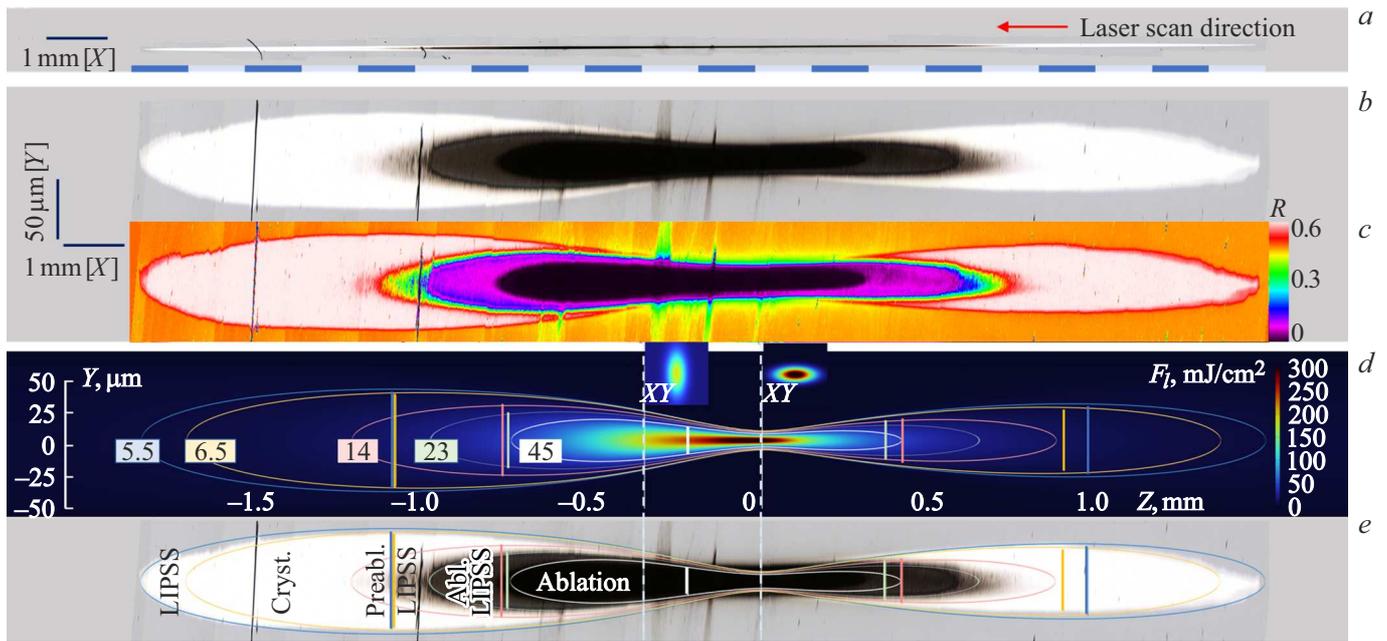
Экспериментальная установка для оптической модификации пленки (рис. 1) была основана на фемтосекундной лазерной системе с регенеративным усилителем TETA-20/200-HE-SP (Авеста,  $\lambda = 1030 \text{ nm}$ , минимальная длительность импульса  $\tau = 250 \text{ fs}$ , максимальная средняя мощность  $P = 20 \text{ W}$ ) и гальванометрическом



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки на основе фемтосекундного лазера с длиной волны  $1030 \text{ nm}$ . Mirrors — зеркала, Galvanoscanner — гальваносканер для управления положением пучка, Lens — фокусирующая линза,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  — образец, расположенный под углом  $11^\circ$  к горизонтальной плоскости. E указывает направление поляризации лазерного излучения.

сканаторе hurrySCAN III 14 (SCANLAB) с линзой LINOS F-Theta Ronar (фокусное расстояние  $70 \text{ mm}$ ). Такая система формирует пучок с диаметром пятна в перетяжке  $2w = 27 \text{ }\mu\text{m}$  (по уровню  $1/e^2$  интенсивности). Геометрические параметры и мощность лазерного пучка определяли посредством профилометра BP209-VIS (ThorLabs) и измерителя Nova II (Ophir). Измерение профиля пучка при смещении вдоль оптической оси (смещении профилометра вдоль оси Z) позволило определить сдвиг между перетяжками в плоскостях ZX и ZY:  $\Delta_{\text{exp}} = 300\text{--}400 \text{ }\mu\text{m}$ .

**Параметры облучения.** При облучении пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  средняя мощность лазерного излучения составляла  $P = 100 \text{ mW}$ , длительность импульсов  $\tau = 250 \text{ fs}$ , поляризация светового пучка была параллельна направлению сканирования (вдоль оси X). Для записи полосы модификации предварительно подбирали оптимальные параметры (при нормальном падении светового пучка без движения образца по оси Z), соответствовавшие формированию в доабляционном режиме предельно ши-



**Рис. 2.** (a) Изображение записанной полосы модификации, (b) это же изображение, растянутое в 20 раз вдоль  $Y$ , и (c) соответствующая цветовая карта коэффициента отражения. (d) Численное моделирование распределения плотности энергии излучения  $F_l$  в плоскости  $YZ$ . Цветные линии отмечают области постоянной плотности энергии (изолинии  $F_l$ ), подобранные по экспериментально измеренным ширинам зон модификации (вертикальные отрезки). Штрихами показаны положения перетяжек  $w_{0x}$  и  $w_{0y}$  рассчитанного астигматического пучка, рядом приведены соответствующие распределения плотности энергии в плоскости  $XY$ . (e) Наложение изолиний плотности энергии на изображение рис. 2, b.

рокой полосы с лазерно индуцированными двухфазными периодическими поверхностными структурами с ровными краями, но без зоны сплошной кристаллизации. В нашем случае это достигалось в расходящемся пучке (2 mm от фокальной плоскости) и при сканировании со скоростью  $V_x = 400 \mu\text{m/s}$  и частоте следования импульсов  $\nu = 100 \text{ kHz}$ . Число импульсов  $N_p$  на одну точку поверхности, определяемое, согласно [21], соотношением

$$N_p = D \frac{\nu}{V_x}, \quad (1)$$

где  $D = 2w_x$  — диаметр пучка на образце, превышает  $10^3$ , что хорошо согласуется с известными данными по числу импульсов, необходимому для появления аморфно-кристаллических ЛИППС [16,19].

**Двухкоординатное XZ-сканирование** реализовывали, устанавливая образец под углом к плоскости  $XY$  (рис. 1) и перемещая пучок вдоль оси  $X$ . Угол наклона образца и точку начала сканирования выбирали так, чтобы при смещении пучка точка облучения смещалась на несколько миллиметров по оси  $Z$ , проходя положение перетяжки  $Z = 0$  (двигаясь из сходящегося пучка в расходящийся). Соответствующее изменение размеров облучаемой области обеспечивало диапазон изменения параметров излучения, в частности плотности энергии, достаточный для проявления различных режимов модификации. Угол наклона образца был равен  $11^\circ$ , смещение при сканировании вдоль оси  $X$  составляло 3 см.

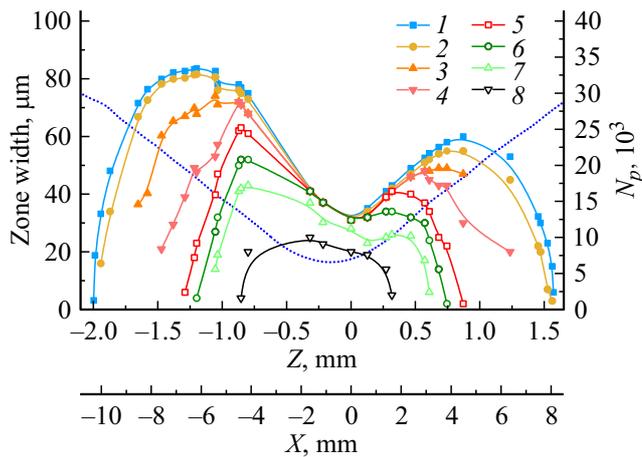
**Анализ модифицированной области**, ее размеров и формы проводили с помощью поляризационного оптического микроскопа BiOptic SM-300 (Opto-Edu), оснащенного 12-мегапиксельной CMOS-камерой SIMAGIS TC-63CU. Коэффициент отражения

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k_{\text{ext}}^2}{(n + 1)^2 + k_{\text{ext}}^2}, \quad (2)$$

где  $n$  — показатель преломления, а  $k_{\text{ext}}$  — коэффициент экстинкции, для видимого диапазона составляет 0.43 (для аморфной пленки) и 0.61 (для закристаллизованной). Значения параметров  $n^a = 4.2$ ,  $k_{\text{ext}}^a = 0.5$  и  $n^c = 6.5$ ,  $k_{\text{ext}}^c = 2$  для аморфной и кристаллической фаз  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  взяты из [22]. Значительная разница в коэффициентах отражения дает возможность выделять зоны модификации на изображении, получаемом с помощью оптического микроскопа в режиме отражения. Можно полагать, что коэффициент отражения линейно связан со степенью кристалличности  $\chi$  (согласно [23]), что позволяет считать эту величину пропорциональной яркости изображения в участках, где яркость выше яркости фона (фон соответствует отражению от немодифицированной аморфной поверхности пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ).

## Результаты и их обсуждение

XZ-сканирование отображает результат модификации с различными параметрами излучения (которые меня-



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости размеров зон различной модификации в записанной линии от координаты: 1 — зона двухфазных аморфно-кристаллических ЛИППС; 2 — зона частичной кристаллизации; 3 — зона максимальной кристаллизации; 4 — зона повторных двухфазных ЛИППС; 5 — зона формирования преабляционных эквидистантных наносфер; 6 — зона формирования периодических структур вследствие массопереноса; 7 — зона абляционных ЛИППС; 8 — зона абляции. Пунктирная линия соответствует числу фемтосекундных импульсов  $N_p$ , приходящихся на точку поверхности. Оси абсцисс показывают смещение пучка относительно образца по вертикали ( $Z$ ) и горизонтали ( $X$ ).

ются вследствие смещения точки облучения по оси  $Z$  на ось  $X$  в виде линии модификации. Записанная таким образом линия позволяет сопоставлять параметры излучения, такие как размер пучка, плотность энергии и число импульсов на точку, с формой записанной локальной модификации. Отметим, что изменение направления сканирования (движение из расходящегося в сходящийся пучок и наоборот) не влияло на вид записанной полосы модификации и расположение характерных зон.

В нашем случае длина записанной линии (рис. 2, *a*) составила 19.2 mm (это соответствует смещению по  $Z$  от  $-2$  до 1.6 mm). На растянутом (вдоль  $Y$ ) изображении записанной полосы (рис. 2, *b*) видны несколько характерных зон, отличающихся коэффициентом отражения и структурой. Значительные отличия в величине коэффициента отражения хорошо иллюстрирует цветовая карта (рис. 2, *c*), где яркость изображения представлена в виде цветовой последовательности. Данное изображение позволило определить границы зон, для каждой из которых измеряли ширину в зависимости от продольной координаты  $X$  (рис. 3). Всего наблюдали восемь зон, качественно отличающихся по структуре изображения. Самой периферийной была зона периодических поверхностных структур из чередующихся линий аморфной и кристаллической фаз (зона 1), в центральной области которой появлялась полоса постоянной кристаллизации (зона 2). При увеличении плотности мощности эта область становилась полностью закристаллизованной (зона 3). Далее

вновь следовали аморфные и кристаллические линии, которые можно связать с периодической реаморфизацией либо с повторным формированием ЛИППС поверх реаморфизованной области (зона 4). В зонах 5, 6 и 7 проявлялись преабляционные процессы, подробно описанные в [17]: формирование наносфер  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (зона 5), формирование гребней и впадин вследствие массопереноса (зона 6) и образование периодических структур (зона 7). Последняя зона (8) соответствовала полному разрушению пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  вследствие абляционных процессов.

Как видно из рис. 2, *b* и рис. 3, записанная полоса имеет выраженную асимметрию в продольном направлении, соответствующем сканированию по  $X$  (и по  $Z$ , поскольку образец расположен под углом к плоскости  $XY$ ). Формы областей модификации в расходящемся и сходящемся пучках отличаются: максимальная ширина записанной области в расходящемся пучке достигала  $84 \mu\text{m}$ , а в сходящемся —  $60 \mu\text{m}$ . Такая разница обусловлена астигматизмом и, как следствие, эллиптичностью пучка. С учетом этого факта мы проводили оценку локальной плотности энергии воздействующего излучения с помощью гауссова распределения с различным значением перетяжек и положений фокальных плоскостей для ортогональных компонент:

$$F_l(x, y, z) = \frac{1}{v} \frac{2P}{\pi w_{0x} w_{0y}} \frac{w_{0x}}{w_x} \frac{w_{0y}}{w_y} e^{-\frac{2x^2}{w_x^2}} e^{-\frac{2y^2}{w_y^2}}, \quad (3)$$

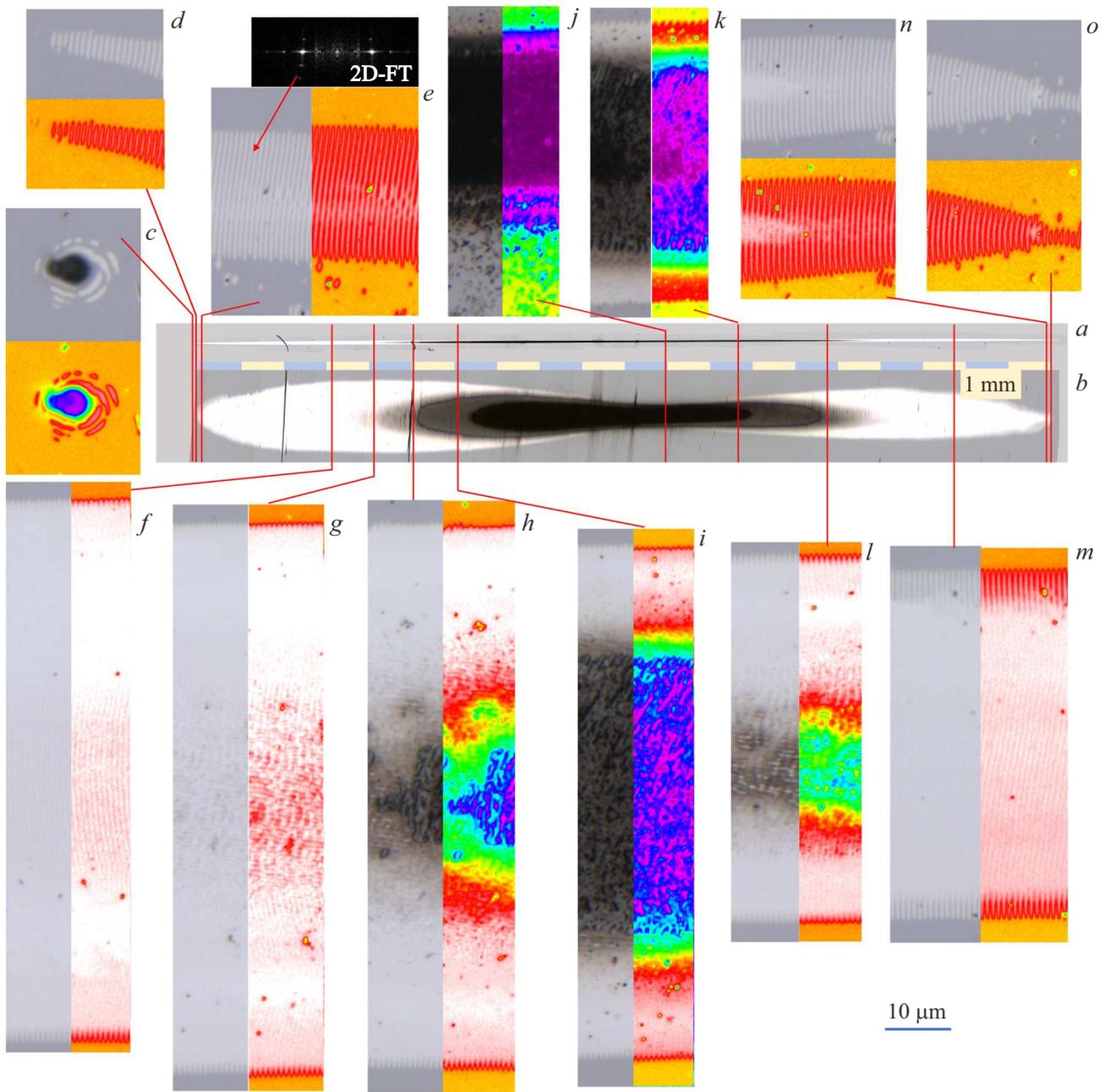
где  $w_{0x}$ ,  $w_{0y}$  — радиусы перетяжек,

$$w_x(z) = w_{0x} \sqrt{1 + \frac{z^2}{Z_{rx}^2}}, \quad (4)$$

$$w_y(z) = w_{0y} \sqrt{1 + \frac{(z + \Delta)^2}{Z_{ry}^2}}, \quad (5)$$

$$Z_{rx} = \frac{\pi w_{0x}^2}{\lambda}, \quad Z_{ry} = \frac{\pi w_{0y}^2}{\lambda}, \quad (6)$$

$\Delta$  — расстояние между перетяжками,  $Z_{rx}$  и  $Z_{ry}$  — релеевские длины вдоль соответствующих осей координат. При расчете  $F_l$  использовали значения  $w_{0x} = 6 \mu\text{m}$  и  $w_{0y} = 8.5 \mu\text{m}$ , соответствующие параметрам гауссовой моды и хорошо описывающие экспериментальное распределение плотности энергии при  $|Z| > Z_{rx}$ ,  $Z_{ry}$ , но значительно отличающиеся от измеренных значений  $w_{0x}$  и  $w_{0y}$  вблизи перетяжки. Используемое в расчетах значение  $\Delta = 350 \mu\text{m}$  лежит в пределах экспериментально измеренного диапазона значений  $\Delta_{\text{exp}}$ . Расположение и ширина каждой из зон модификации в диапазоне  $|Z| > Z_{rx}$ ,  $Z_{ry}$  хорошо соответствуют линиям равной плотности энергии (рис. 2, *d*), что демонстрируется наложением изолиний на границы зон (рис. 2, *e*). Вблизи фокальной области ( $|Z| < Z_{rx}$ ,  $Z_{ry}$ ) ширина записанной зоны ( $30 \mu\text{m}$ ) значительно больше размера рассчитанного размера пучка, но согласуется с экспериментально



**Рис. 4.** (a) Изображение записанной полосы, полученное с помощью оптического микроскопа и (b) растянутое в 20 раз по вертикали. (c–o) Увеличенные изображения и цветовые карты яркости для отмеченных красными линиями участков модификации, соответствующих различным режимам лазерного воздействия: (c) аморфно-кристаллические ЛИППС вблизи дефектов; (d, o) начало и окончание полосы модификации; (e) регулярные аморфно-кристаллические ЛИППС и соответствующий фурье-образ; (f, m) области полной кристаллизации на фоне ЛИППС; (g, l) возникновение наносфер на фоне закристаллизованной зоны (максимальная ширина полосы модификации); (h, i) абляционные ЛИППС на границе с предабляционной областью; (j) область абляции (минимальная ширина полосы); (k) абляционные ЛИППС и начало абляции в центральной области; (l) появление предабляционных периодических структур, обусловленных массопереносом; (n) появление частичной кристаллизации на фоне ЛИППС. Масштаб для изображений (c–o) показан в правом нижнем углу.

измеренным значением ( $27\ \mu\text{m}$ ). Отметим, что наложение рассчитанных с помощью (3) изолиний плотности энергии можно осуществить только при определенных значениях  $w_{0x}$ ,  $w_{0y}$  и  $\Delta$ , что позволяет использовать изображение модифицированной области для определе-

ния характеристик воздействующего светового пучка с неизвестными геометрическими параметрами.

По мере удаления от положения фокуса увеличивается размер облучаемой области, и, в соответствии с соотношением (1) возрастает количество импульсов

$N_p$ , приходящихся на одну точку поверхности образца (рис. 3, пунктирная кривая). В нашем случае  $N_p$  изменялось в несколько раз (от  $6.5 \cdot 10^3$  до  $33 \cdot 10^3$ ), однако границы зон согласовались именно с плотностью энергии. Таким образом, число импульсов в рассмотренном диапазоне мало влияет на процесс модификации и определяющим фактором является плотность энергии, что соответствует результатам [16,19]. Как видно из рис. 3, кривые 1 и 2 близки друг к другу по всей длине линии модификации, что свидетельствует о предельно узком энергетическом диапазоне возникновения аморфно-кристаллических структур.

Рассмотрим более подробно проявление различных эффектов в выделенных зонах модификации (рис. 4). По мере смещения к фокусу и соответствующего увеличения плотности энергии первыми появляются периодические объекты вокруг дефектов на поверхности пленки (рис. 4, *c*), что согласуется с наблюдаемым в [24] снижением энергетического порога формирования ЛИППС. Далее формируется непрерывная зона регулярных периодических структур из линий кристаллической и аморфной фаз, ориентированных перпендикулярно поляризации светового поля и чередующихся с периодом, близким к длине волны (рис. 4, *d, e, n, o*). Такая модификация поверхности представляет собой лазерно индуцированные периодические поверхностные структуры с низкой пространственной частотой (Low Spatial Frequency-Laser Induced Periodic Surface Structures, LSF-LIPSS) [18], возникновение которых обычно связывают с формированием поверхностного плазмон-поляритона и последующей его интерференцией с падающим излучением [14,16,18]. Значение локальной плотности энергии  $F_l$  в областях начала формирования аморфно-кристаллических ЛИППС составляло около  $5 \text{ mJ/cm}^2$ . Непрерывная зона регулярных ЛИППС соответствовала  $F_l > 5.5 \text{ mJ/cm}^2$  (рис. 4, *d, e, o*) и также наблюдалась вдоль всей внешней границы модифицированной области (периферия на рис. 4, *f-n*). Вся зона аморфно-кристаллических ЛИППС укладывается в диапазон  $F_l = 5.5-6.5 \text{ mJ/cm}^2$ , что хорошо соответствует результатам работ [13,16] (в указанных работах приведены значения средней плотности энергии, которые примерно в два раза меньше, чем локальное значение  $F_l$ ).

Начиная со значений  $F_l > 6.5 \text{ mJ/cm}^2$  в центральной части полосы происходит падение контраста ЛИППС (рис. 4, *m*), что говорит о начале формирования сплошной закристаллизованной области. При дальнейшем увеличении плотности энергии до  $14 \text{ mJ/cm}^2$  вместе с увеличением ширины зоны полной кристаллизации в центре вновь появляются периодические структуры (рис. 4, *e*), что может быть связано с повторным формированием ЛИППС на реаморфизованной фемтосекундным пучком области или вследствие периодической реаморфизации.

Последующее увеличение  $F_l$  приводит к проявлению специфических доабляционных и абляционных эффектов (рис. 4, *g-l*). Здесь отметим зону (рис. 4, *g, l*)

с  $F_l = 15-20 \text{ mJ/cm}^2$ , где формируются эквидистантные наносферы аморфного  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , которые, при увеличении плотности энергии ( $F_l = 20-45 \text{ mJ/cm}^2$ ), становятся абляционной периодической структурой (рис. 4, *h, i, l*) (эти процессы подробно описаны в [17]). Наконец, в области максимальной плотности энергии вблизи перетяжки пучка почти вся наблюдаемая зона модификации соответствует абляции материала с поверхности подложки (рис. 4, *j, k*).

Таким образом, положение всех записанных при сканировании характерных зон хорошо согласуется с изолиниями плотности энергии. Поскольку многие из рассмотренных для пленки  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  эффектов проявляются при изменении плотности энергии лазерного излучения во многих других материалах, то и для них предлагаемый метод двухкоординатного сканирования будет актуален.

## Заключение

Проведенные исследования фемтосекундной модификации тонкой аморфной пленки показали, что предлагаемый метод одновременного сканирования вдоль координат  $X$  и  $Z$  позволяет за один проход сформировать и затем проанализировать основные эффекты лазерного воздействия на поверхность фазопеременного материала: формирование двухфазных периодических структур, кристаллизацию, образование предабляционных периодических структур и абляционное разрушение пленки. XZ-сканирование дает возможность определения энергетических границ характерных процессов, наблюдаемых при лазерном воздействии. Так, для  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  диапазон плотностей энергии формирования двухфазных ЛИППС составляет  $F_l = 5-7 \text{ mJ/cm}^2$ , диапазон однородной кристаллизации —  $F_l = 7-15 \text{ mJ/cm}^2$ , предабляционные периодические структуры формируются при  $F_l = 15-45 \text{ mJ/cm}^2$ , выше происходит абляция.

Искажение формы пучка (астигматизм, эллиптичность и т.д.) не ограничивает применимость метода. Наоборот, если определение параметров пучка затруднено (например, вследствие высокой энергии в импульсе или специфической длины волны), то расположение и форма характерных зон модификации позволяют оценить распределение плотности энергии воздействующего излучения в продольном и поперечном направлениях. Эта особенность представляется перспективной для материалов, проявляющих различные светоиндуцированные явления, причем особо интересным является случай формирующихся в узком энергетическом диапазоне структур, таких как доабляционные ЛИППС. К таким материалам относятся фазопеременные материалы, в частности исследуемая пленка  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ . Воздействие ультракоротких импульсов (фемто- и пикосекундной) длительности позволяет реализовать наибольшее количество эффектов модификации поверхности  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , однако предлагаемый подход применим и для более дли-

тельных оптических импульсов (вплоть до непрерывного излучения).

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00977, <https://rscf.ru/project/23-29-00977/>.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J. Hegedüs, S.R. Elliott. *Nat. Mater.*, **7**(5), 399 (2008). DOI: 10.1038/nmat2157
- [2] M. Wuttig, N. Yamada. *Nat. Mater.*, **6**(11), 824 (2007). DOI: 10.1038/nmat2009
- [3] S. Abdollahramezani, O. Hemmatyar, H. Taghinejad, A. Krasnok, Y. Kiarashinejad, M. Zandehshahvar, A. Alú, A. Adibi. *Nanophotonics*, **9**(5), 1189 (2020). DOI: 10.1515/nanoph-2020-0039
- [4] Q. Wang, E.T.F. Rogers, B. Gholipour, C.-M. Wang, G. Yuan, J. Teng, N.I. Zheludev. *Nat. Photonics*, **10**(1), 60 (2016). DOI: 10.1038/nphoton.2015.247
- [5] Z. Guo, X. Yang, F. Shen, Q. Zhou, J. Gao, K. Guo. *Sci. Rep.*, **8**(1), 12433 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-30550-2
- [6] С.А. Козюхин, П.И. Лазаренко, А.И. Попов, И.Л. Еременко. *Успехи химии*, **91**(9), RCR5033 (2022). DOI: 10.1070/RCR5033 [S.A. Kozyukhin, P.I. Lazarenko, A.I. Popov, I.L. Eremenko. *Russ. Chem. Rev.*, **91**(9), RCR5033 (2022). DOI: 10.1070/RCR5033].
- [7] I. Friedrich, V. Weidenhof, S. Lenk, M. Wuttig. *Thin Solid Films*, **389**(1), 239 (2001). DOI: 10.1016/S0040-6090(01)00891-4
- [8] J. Fu, X. Shen, Y. Xu, G. Wang, Q. Nie, C. Lin, S. Dai, T. Xu, R. Wang. *Mater. Lett.*, **88**, 148 (2012). DOI: 10.1016/j.matlet.2012.08.051
- [9] G. D'Arrigo, M. Scuderi, A. Mio, G. Favar, M. Conte, A. Sciuto, M. Buscema, G. Li-Destri, E. Carria, D. Mello, M. Calabretta, A. Sitta, J. Pries, E. Rimini. *Mater. Design*, **202**, 109545 (2021). DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109545
- [10] Y. Liu, M.M. Aziz, A. Shalini, C.D. Wright, R.J. Hicken. *J. Appl. Phys.*, **112**(12) (2012). DOI: 10.1063/1.4770359
- [11] A.V. Kiselev, V.V. Ionin, A.A. Burtsev, N.N. Eliseev, V.A. Mikhalevsky, N.A. Arkharova, D.N. Khmelinin, A.A. Lotin. *Opt. Laser Technol.*, **147**, 107701 (2022). DOI: 10.1016/j.optlastec.2021.107701
- [12] S.A. Kozyukhin, P.I. Lazarenko, Yu.V. Vorobyov, M.S. Saveleyev, A.A. Polokhin, V.B. Glukhenkaya, A.A. Sherchenkov, A.Y. Gerasimenko. *Mater. Tech.*, **107**(3), 307 (2019). DOI: 10.1051/mattech/2019008
- [13] S. Kozyukhin, M. Smayev, V. Sigaev, Yu. Vorobyov, Yu. Zaytseva, A. Sherchenkov, P. Lazarenko. *Phys. Status Solidi B*, **257**(11), 1900617 (2020). DOI: 10.1002/pssb.201900617
- [14] S. Zaboltnov, A. Kolchin, D. Shuleiko, D. Presnov, T. Kaminskaya, P. Lazarenko, V. Glukhenkaya, T. Kunkel, S. Kozyukhin, P. Kashkarov. *Micro*, **2**(1), 88 (2022). DOI: 10.3390/micro2010005
- [15] K. Zhao, W. Han, Z. Han, X. Zhang, X. Zhang, X. Duan, M. Wang, Y. Yuan, P. Zuo. *Nanophotonics*, **11**(13), 3101 (2022). DOI: 10.1515/nanoph-2022-0133
- [16] M.P. Smayev, P.I. Lazarenko, I.A. Budagovsky, A.O. Yakubov, V.N. Borisov, Yu.V. Vorobyov, T.S. Kunkel, S.A. Kozyukhin. *Opt. Laser Technol.*, **153**, 108212 (2022). DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108212
- [17] T. Kunkel, Yu. Vorobyov, M. Smayev, P. Lazarenko, A. Kolobov, S. Kozyukhin. *Appl. Surf. Sci.*, **624**, 157122 (2023). DOI: 10.1016/j.apsusc.2023.157122
- [18] J. Bonse, A. Rosenfeld, J. Krüger. *J. Appl. Phys.*, **106**(10) (2009). DOI: 10.1063/1.3261734
- [19] М.П. Смаев, П.И. Лазаренко, М.Е. Федянина, И.А. Будаговский, А. Рааб, И.В. Сагунова, С.А. Козюхин. *Опт. и спектр.*, **131**(2), 196 (2023). DOI: 10.21883/OS.2023.02.55005.15-23 [M.P. Smayev, P.I. Lazarenko, M.E. Fedyanina, I.A. Budagovsky, A. Raab, I.V. Sagunova, S.A. Kozyukhin. *Opt. Spectrosc.*, **131**(2), 185 (2023). DOI:10.61011/EOS.2023.02.55783.15-23].
- [20] C. Ruiz de Galarreta, S.G.C. Carrillo, Y.Y. Au, E. Gemo, L. Trimby, J. Shields, E. Humphreys, J. Faneca, L. Cai, A. Baldycheva, J. Bertolotti, C.D. Wright. *J. Opt.*, **22**(11), 114001 (2020). DOI: 10.1088/2040-8986/abb5b
- [21] F. Chen, J.R.V. de Aldana. *Las. Photonics Rev.*, **8**(2), 251 (2014). DOI: 10.1002/lpor.201300025
- [22] Ya.S. Lebedeva, M.P. Smayev, I.A. Budagovsky, M.E. Fedyanina, I.S. Sinev, T.S. Kunkel, A.V. Romashkin, P.A. Smirnov, A.A. Sherchenkov, S.A. Kozyukhin, P.I. Lazarenko. *J. Surf. Invest.*, **17**(Suppl. 1), S339 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070297
- [23] V. Weidenhof, I. Friedrich, S. Ziegler, M. Wuttig. *J. Appl. Phys.*, **89**(6), 3168 (2001). DOI: 10.1063/1.1351868
- [24] H. Shimizu, S. Yada, G. Obara, M. Terakawa. *Opt. Express*, **22**(15), 17990 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.017990