

Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений

В. Б. Глухенькая¹, Н. М. Толкач^{1,2}, П. И. Лазаренко¹, А. А. Шерченков¹, С. А. Козюхин³

¹ НИУ «Московский институт электронной техники», Москва, Россия

² Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

³ Институт общей и неорганической химии им. Курнакова РАН, Москва, Россия

Работа посвящена исследованию процесса кристаллизации пленок GST в поле непрерывного лазерного излучения и влияния фазового состояния GST на оптические свойства многослойной структуры GST/ITO/Al/подложка (GIA). Анализ результатов показал, что энергетический диапазон кристаллизации аморфного GST (в составе структуры GIA красного цвета) в fcc-структуру лежит в интервале от 0,11 до 0,22 мДж/мкм². Процесс кристаллизации сопровождается монотонным изменением отражательной способности и формы спектров КРС. Пороговое значение энергии воздействия составляет 1,1 мДж/мкм². Облучение поверхности большими энергиями приводит к деградации материала и его частичному или полному испарению. Результаты данной работы демонстрируют возможность записи однородных многоуровневых оптически контрастных изображений на поверхности структур GIA RGB-цветов.

Ключевые слова: Отражающие дисплеи, GST, Лазерная кристаллизация, Оптический контраст, Перестраиваемость, Энергонезависимость, Активная фотоника.

Цитирование: Глухенькая, В. Б. Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений / В. Б. Глухенькая, Н. М. Толкач, П. И. Лазаренко, А. А. Шерченков, С. А. Козюхин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 181–185.

Введение

Материал $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) интенсивно применяется в области активной фотоники для создания элементов оптических отражающих дисплеев и компьютерно-перестраиваемых голограмм. Широкое распространение тонких плёнок GST в нанофотонике объясняется большим оптическим контрастом (~30%) между аморфным и кристаллическим состояниями, фазовые превращения между которыми могут быть инициированы низкоэнергетическим тепловым, лазерным или электрическим воздействием. Данные фазовые превращения обратимы и протекают за время ~ 500 пс [1]. Кроме того, устройства, разрабатываемые на основе GST энергонезависимы, т.к. материал обладает способностью сохранять фазовое состояние после прекращения энергетического воздействия.

Перечисленные преимущества и применение тонких плёнок GST в составе многослойной структуры GST/ITO/Al/подложка (GIA) делают данный материал привлекательным для разработки элементов отображения информации в видимой и

ИК-областях спектра [2,3]. Цвет структур GIA определяется толщиной слоя ИТО, а оттенок и ее отражательная способность регулируются фазовым состоянием GST.

Данная работа посвящена исследованию процесса кристаллизации GST в поле непрерывного лазерного излучения, влиянию фазового состояния GST на оптические свойства структуры GIA и определению оптимальных энергетических режимов для формирования перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

1. Формирование образцов и методика проведения эксперимента

Слои структур GIA были сформированы методом DC-магнетронного распыления на окисленные кремниевые подложки. Контроль толщины осаждаемых слоев проводился методом стилусной профилометрии по образцам-спутникам. Толщины слоев выбирались по результатам математического моделирования так, чтобы цвет структуры GIA соответствовал классическим RGB-цветам: GST (10 нм), Al (100 нм) и ИТО (160, 70 и 200 нм для R-, G- и B-цветов соответственно). Моделирование выполнялось в среде Mathcad по формулам Френеля для многослойных систем с учетом измеренных спектров показателя преломления $n(\lambda)$ и коэффициента экстинкции $k(\lambda)$ для каждого слоя моделируемой многослойной структуры.

Лазерная кристаллизация тонких пленок GST проводилась в поле непрерывного лазерного излучения в режиме сканирования ($\lambda = 403$ и 532 нм, $P_{\text{max}}=5$ мВт, 1 Гц) с плотностью энергии в диапазоне от 0,001 до 1,200 мДж/мкм². Структурные изменения модифицированных в процессе лазерного сканирования областей исследовались методом комбинационной спектроскопии (КРС), а расчет оптического контраста проводился по изменению отражательной способности поверхности после облучения.

2. Обсуждение полученных результатов

На рис. 1 представлена матрица из 32 протяженных областей, полученных вследствие сканирования поверхности структуры GIA непрерывным лазерным излучением. Размер сформированных областей соответствует площади сканирования и составляет 5x5 мкм².

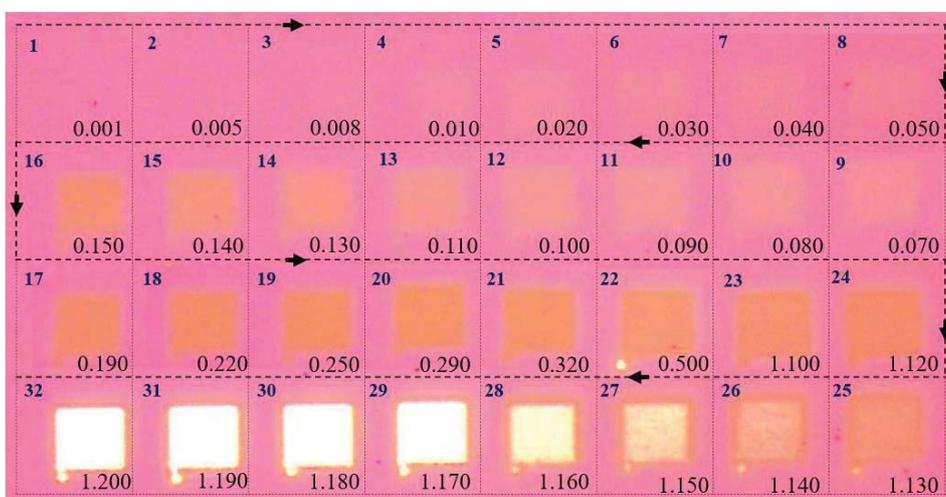


Рис. 1. Матрица на поверхности структуры GIA (номер точки и плотность энергии (мДж/мкм²) отмечены в левом верхнем и правом нижнем углах соответственно).

Из рис. 1 видно, что увеличение энергии облучения сопровождается монотонным изменением отражательной способности поверхности. Оптические изменения поверхности пленок GST после лазерного воздействия можно разделить на 4 группы (рис. 2а).

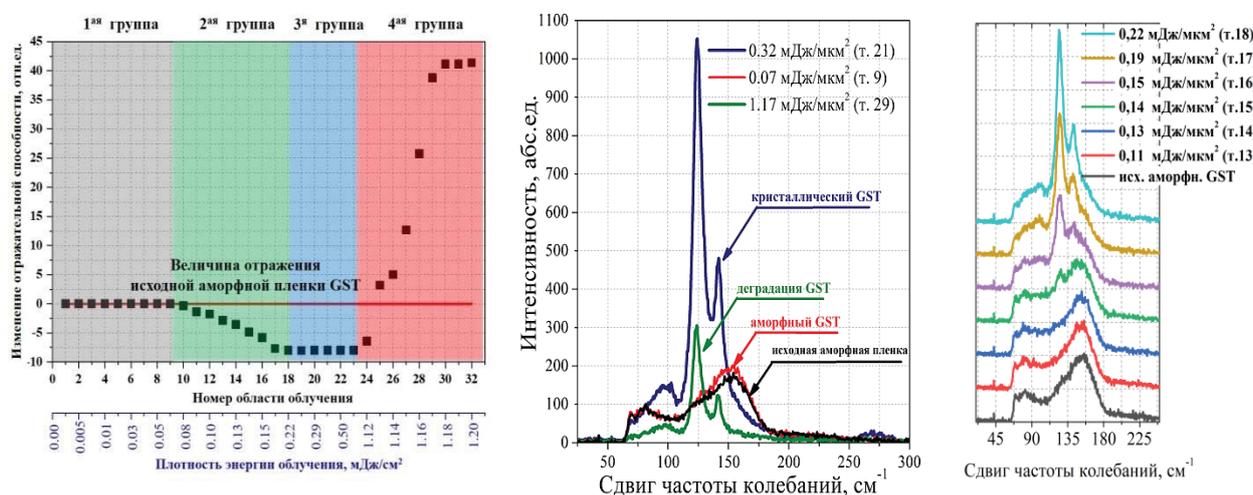
1-ая группа – области, отражательная способность которых не изменилась или изменилась незначительно (до 0,070 мДж/мкм²). Результаты КРС для этих участков показали, что материал GST находится в исходном аморфном состоянии (рис. 2б).

2-ая группа – области с монотонным уменьшением отражательной способности (от 0,07 до 0,22 мДж/мкм²). Анализ изменений оптического контраста и формы спектров КР показал, что монотонные изменения соответствуют фазовому переходу GST из аморфного состояния в кристаллическое (рис. 2в), сопровождающемуся изменением оптического контраста на 8 у.е.

3-я группа – области, коэффициент отражения в которых выше, чем у исходной аморфной пленки (от 0,22 до 1,08 мДж/мкм²). КР спектры, полученные от этих областей, соответствуют спектрам GST в кристаллическом состоянии с ГЦК-решеткой (рис. 2б).

4-ая группа – области (более 1,08 мДж/мкм²), в которых наблюдается увеличение отражательной способности. Это объясняется деградацией облучаемого материала и его частичным испарением и сопровождается уменьшением площади КР спектров (рис. 2б).

Аналогичные результаты были получены на поверхности структур GIA зеленого и синего цветов. Анализ результатов показал, что минимальная пороговая величина лазерного воздействия, приводящая к кристаллизации материала, составляет 0,17 и 0,10 мДж/мкм², а деградации - 1,1 и 0,17 мДж/мкм² для синего и зеленого образцов соответственно.



а) Изменение отражательной способности тонкой пленки GST

б) Спектры КРС пленки GST до и после облучения

в) Изменение формы спектров КРС в процессе фазового перехода

Рис. 2. Комплексный анализ поверхности структуры GIA после лазерной модификации

Описанный комплексный подход позволяет применять многослойные структуры GIA для формирования перестраиваемых оптических изображений в многоуровневых оптических устройствах. На рис. 3 продемонстрирована запись оптически контрастных изображений

(40x40 мкм²) на поверхности структур GIA красного (532 нм и 0,22 мДж/мкм²), зеленого (403 нм 0,10 мДж/мкм²) и синего (532 нм и 0,17 мДж/мкм²) цветов.



Рис. 3. Протяженные оптически контрастные RGB-изображения на поверхности структуры GIA`

Заключение

Анализ результатов показал, что энергетический диапазон кристаллизации аморфного GST (в составе структуры GIA красного цвета) в fcc лежит в интервале от 0,11 до 0,22 мДж/мкм². Процесс кристаллизации сопровождается монотонным изменением отражательной способности и формы спектров КРС. Пороговое значение энергии воздействия составляет 1,1 мДж/мкм². Облучение поверхности большими энергиями приводит к деградации материала и его частичному или полному испарению.

Установлены режимы записи оптически контрастного однородного изображения большой площади на поверхности структуры GIA: 0,22 мДж/мкм², 0,10 мДж/мкм² и 0,17 мДж/мкм² для структуры GIA красного, зеленого и синего цветов соответственно. Скорость сканирования - 1 Гц..

Результаты данной работы демонстрируют возможность формирования слоев с различной долей кристаллической фазы и могут быть использованы для разработки технологии создания многоуровневых энергонезависимых перестраиваемых элементов для устройств активной нанофотоники и систем отображения информации.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект №20-79-10322).

Список источников

- [1] **Lotnyk A.** Temperature dependent evolution of local structure in chalcogenide-based superlattices / A. Lotnyk, I. Hilmi, M. Behrens, B. Rauschenbach // *Applied Surface Science*. — 2021. — Vol. 536. — P. 147959. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147959.
- [2] **Galarreta C.** Reconfigurable multilevel control of hybrid all-dielectric phase-change metasurfaces / C. Galarreta, I. Sinev, A. Alexeev, P. Trofimov, K. Ladutenko, S. Carrillo, E. Gemo, A. Baldycheva, J. Bertolotti, C. Wright // *Optica*. — 2020. — Vol. 7. — P. 476-484. — DOI: 10.1364/OPTICA.384138.
- [3] **Zhou H.** Switchable active phase modulation and holography encryption based on hybrid metasurfaces / H. Zhou, Y. Wang, X. Li, Q. Wang, Q. Wei, G. Geng, L. Huang // *Nanophotonics*. — 2020. — Vol. 9. — P. 905-912. — DOI: 10.1515/nanoph-2019-0519.

Formation of tunable non-volatile optically contrast image on the surface of Ge₂Sb₂Te₅ thin films for multicolor reflective displays and holograms application

V. Glukhenkaya¹, N. Tolkach^{1,2}, P. Lazarenko¹, A. Sherchenkov¹, S. Kozukhin³

¹ National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

² Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia

³ Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

Crystallization process initiated in GST thin film under CW laser irradiation and influence of phase state of GST films on optical properties of multilayered GST/ITO/Al (GIA) structure were investigated. It was shown, that continuous laser exposure leads to significant changes of the optical contrast and Raman spectra of extended areas modifying by CW laser irradiation. Range of changes corresponds to the phase transition of amorphous GST thin film into crystalline state. The energy range of crystallization is in the interval from 0.11 to 0.22 mJ/μm². The difference in reflectivity change between two phase states is 8 r.u. The threshold energy value of GST material degradation is more than 1.10 mJ/μm². The results of this work demonstrate the possibility of recording optically uniform multilevel optically contrast large-size image on the surface of GIA RGB-color structures.

Keywords: Reflective display, GST, Laser crystallization, Optical contrast, Tunability, Non-volatility, Active photonics.