

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2022 году

по проекту «**Разработка интерференционных покрытий  
нелинейно-оптического кристалла ZnGeP<sub>2</sub> для повышения эффективности  
лазерных систем среднего ИК диапазона**»,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-22-20103

Руководитель: Зиновьев Михаил Михайлович

В рамках выполнения проекта были получены образцы монокристаллов ZnGeP<sub>2</sub> с проведением постростовых обработок, в качестве подложек для напыления оптических просветляющих покрытий. На основе данного кристалла на сегодня построены мощные системы параметрическим преобразованием света (ПГС), работающие в диапазонах 3,5–8 мкм при накачке их лазерами с длиной волны близкой к ~2,1 мкм. Для того, чтобы обеспечить его эффективную работу, необходимо просветление рабочих граней кристалла с остаточным отражением не более  $R \leq 1\%$  на длинах волн накачки и  $R \leq 2\%$  в диапазоне генерации. Это обеспечит пропускание кристалла на уровне 93–95 %. Для этого был выполнен математический расчет многослойных просветляющих покрытий с использованием различных пленкообразующих материалов (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, YbF<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, HfO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и ZnS.) из открытой базы refractiveindex.info в программной среде Optilayer v.14,57. Затем были экспериментально получены оптические дисперсии материалов. По полученным дисперсиям была выполнена корректировка и адаптация рассчитанных покрытий для вакуумно-напылительной машины Аспира-200. Произведено напыление данных просветляющих покрытий на подложку ZGP, проведено исследование их морфологии и дефектной структуры.

В ходе выполнения проекта были получены и обобщены данные о формировании различной дефектной на подложке, в монослоях и в многослойных интерференционных покрытиях различного состава нанесенных на ZGP при помощи ионно-лучевого распыления. Установлено, что сильное влияние на образование дефектов, как на подложке, так и в процессе роста пленки оказывает компенсация ионного заряда. При перекомпенсации ионного потока на подложке и в пленке может возникать электронный пробой, который влечет за собой появление дефектной структуры типа «звездное небо». В обратном случае, при недокомпенсации, происходит ионный пробой, в результате которого формируется множество крупных кратеров по всей исследуемой поверхности кристалла. Установлено, что оптимальным соотношением ток эмиссии компенсаторов к току ускоряющего разряда является 1/1,3 (ток эмиссии термокатодов выше тока разряда на 30 %) наблюдается полная компенсация ионного заряда. При этом не наблюдается значимого электронного тока на подложках, вызывающего появления дефектов, а пленки получаются чистыми и бездефектными.

Установлено, что распыление мишени чистого кремния (Si) в реактивной среде кислорода, может вызывать в пленке появление отдельных конгломератов чистого кремния в растущей пленке SiO<sub>2</sub>. Подобная дефектная структура также найдена и в многослойном покрытии Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>. Данные конгломераты являются дефектной структурой, и могут оказывать влияние на ПЛИП оптического покрытия и кристалла ZGP.

Установлено, что оптические покрытия, содержащие слои HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не могут быть нанесены на подложку ZGP методом ИЛР. Основной механизм, препятствующий этому, высокие механические напряжения в пленке и/или их несоответствие между системой пленка/подложка. Данный эффект вызывает растрескивание и отслоение оптического покрытия уже в процессе роста пленки в напылительной камере.

Показано, что покрытия на основе TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> в четырехслойном исполнении и покрытия ZnS/YbF<sub>3</sub> в шестислойном исполнении, нанесенные на подложку ZGP, обладают хорошими термомеханическими свойствами, а также межслоевой адгезией и адгезией к подложке.

Также в ходе реализации проекта были получены экспериментальные данные о пороге лазерно-индуцированного повреждения (ПЛИП) поверхности кристалла ZGP без покрытий с применением оптоволоконного лазера на ионах иттербия с длиной волны 1030 нм, а также с использованием Ho<sup>3+</sup>:YAG лазера с длиной волны 2097 нм.

Обнаружено, что при использовании лазера с длиной волны длительности импульса 0,3–3,5 пс ПЛИП кристалла ZGP определяется одним и тем же флюенсом (плотностью энергии), который составляет 0,22±0,06 Дж/см<sup>2</sup> при одноимпульсном воздействии. Для более длинных импульсов (3,5–9,5 пс) ПЛИП определяется примерно одинаковой интенсивностью, которая составляет 75±15 ГВт/см<sup>2</sup> при одноимпульсном воздействии. При облучении поверхности кристалла ZGP в многоимпульсном режиме с частотой 0,1–1 кГц ПЛИП оказался равен 0,053±0,006 Дж/см<sup>2</sup>, что примерно в 4 раза меньше, чем при одноимпульсном воздействии.

Также, с применением Ho<sup>3+</sup>:YAG лазера с длиной волны 2097 нм проведено измерение ПЛИП кристалла ZGP, при длительности лазерного импульса 30 нс, частоте следования импульсов 10 кГц и диаметре лазерного пучка в плоскости тестирования d = 360 мкм по уровню e<sup>-2</sup> от максимальной интенсивности. Исследования показали, что среднее значение порога оптического пробоя по 5 образцам составляет (2,2±0,1) Дж/см<sup>2</sup>.

Полученные данные в дальнейшем будут использованы как базовые значения ПЛИП монокристаллов ZGP для оценки влияния и качества созданных интерференционных покрытий на подложке ZGP.

Проведенные исследования показали возможность создания просветляющих покрытий для кристаллов ZGP с оптическими характеристиками, позволяющими добиться пропускания на уровне 94–95 % на длине волны накачки 2,097 мкм. Математически и экспериментально показано, что такие материалы как Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>,

SiO<sub>2</sub>, ZnS, YbF<sub>3</sub> могут быть использованы для напыления оптических покрытий на подложку ZGP ионно-лучевыми методами распыления. Оптические покрытия успешно проходят тест на адгезию и истирание согласно ГОСТ Р ИСО 9211-4-2016.

При выполнении работ по проекту были получены следующие просветляющие покрытия:

- шестислойное покрытие Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>;
- шестислойное покрытие ZnS/YbF<sub>3</sub>;
- четырехслойное покрытие TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>.

Характеризация данных покрытий показала, что они могут быть применимы в лазерных системах среднего ИК диапазона 2-9 мкм, в том числе, при использовании в системах параметрических генераторов света, многоволнового СО лазера с параметрическим преобразованием частоты (ППЧ лазеры среднего ИК). Покрытия позволяют повысить пропускание оптических элементов ZGP на величину до 38 % (57 % пропускание элемента без покрытия), что в свою очередь существенно увеличивает эффективность лазерного преобразования и выходную мощность параметрических систем.

Обобщённые результаты, достигнутые в ходе выполнения проекта, были опубликованы в трех научных статьях, входящих в базы WoS и Scopus. Статья, опубликованная, Applied Optics (Q2, ссылка [https://opg.optica.org/ao/upcoming\\_pdf.cfm?id=475336](https://opg.optica.org/ao/upcoming_pdf.cfm?id=475336)), обобщает результаты совместного с ФИАН исследования оптического разрушения поверхности кристалла ZGP. Статья, опубликованная, Crystals (Q2, ссылка <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/10/1408>), включает в себя основные результаты по напылению пленок на подложку ZGP, рассчитанных и оптимизированных в ходе выполнения проекта. Также, опубликована статья в Coatings (Q2 <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/10/1565>), часть работы (нанесение пленки TiO<sub>2</sub> методом ИЛР) в которой была выполнена в рамках реализации данного проекта. Результаты работы были доложены на VI International Conference on Ultrafast Optical Science “UltrafastLight-2022” 3–7 октября, 2022, Москва.