

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2023 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

Согласно плану работ проведено измерение порога лазерно-индуцированного пробоя (ПЛИП) поверхности образцов ZnGeP<sub>2</sub> (ZGP) с просветляющим интерференционным покрытием и без него. Эксперименты проводились с неселективным СО-лазером низкого давления, работающим в режиме модуляции добротности резонатора. Лазер излучал импульсы длительностью ~0,3 мкс с частотой следования импульсов ~90 Гц. Пиковая мощность одиночного импульса достигала 5,5 кВт при средней выходной мощности ~150 мВт. Спектр излучения СО-лазера состоял из ~60 спектральных линий в диапазоне длин волн от 5 до 6 мкм. Лазерный пучок фокусировался линзой с фокусным расстоянием 48 мм, диаметр пучка в центре перетяжки составлял ~140 мкм. Повреждение непросветленной поверхности кристалла, сопровождаемое появлением плазменного факела, происходило при пиковой мощности лазерных импульсов ~5 кВт, частоте следования импульсов 90 Гц и экспозиции 5-10 с. Оцененная интенсивность оптического пробоя составила 0,033 ГВт/см<sup>2</sup>. В этих же условиях оптическое повреждение на поверхности образца ZnGeP<sub>2</sub> с просветляющим покрытием не наблюдалось, и определить соответствующий ПЛИП не удалось, ввиду ограничения мощности лазера. Отметим, что факт повышения ПЛИП для образца с интерференционным покрытием согласуется с результатами, полученными на других длинах волн и длительностях импульса на первом этапе проекта.

Также были проведены эксперименты по определению ПЛИП образцов ZGP с просветляющим покрытием и без него по методике R-on-1 путем их облучения Ho:YAG лазером, генерирующим излучение на длине волны 2,097 мкм. Было исследовано три образца с различными интерференционными покрытиями: шестислойное покрытие Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> (образец № 1); шестислойное покрытие ZnS/YbF<sub>3</sub> (образец № 2); четырехслойное покрытие TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> (образец № 3). В качестве базового значения были взяты результаты определения ПЛИП образца без покрытия, образец № 0.

ПЛИП кристаллов сильно отличается в зависимости от нанесенного на рабочие грани просветляющего покрытия. ПЛИП образца № 1 с шестислойным покрытием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> в пределах погрешности находится на уровне кристалла без покрытия (образец № 0  $\omega = 2,2 \pm 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>). ПЛИП образца № 1 составляет  $\omega = 2,4 \pm 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>. Однако стоит отметить, что образец без покрытия отражает ~25 % излучения, которое не проходит внутрь кристалла, как в случае просветленного образца. Значения ПЛИП

для образца № 3 составляет  $\omega = 2,9 \pm 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>. Данная пара оксидных материалов показывает лучший по сравнению с образцом № 0 и № 1 результат, обеспечивая лучевую прочность монокристалла ZGP на ~20 % выше. В случае использования шестислойного покрытия на паре материалов ZnS/YbF<sub>3</sub> (образец № 2) мы получили наибольший ПЛИП, который составляет  $\omega = 3,5 \pm 0,1$  Дж/см<sup>2</sup>. Прирост значения ПЛИП составляет до 20 % по сравнению с образцом № 3 и до ~40 % по сравнению с непросветленным образцом. Таким образом, экспериментально показано, что просветляющее покрытие может существенно влиять на ПЛИП монокристалла ZGP. При этом показано, что использование сульфидно-фторидных пар материалов (конкретно в данном случае ZnS и YbF<sub>3</sub>) позволяет получить большие значения ПЛИП кристалла, нежели при использовании оксидных материалов.

На основании полученной информации по ПЛИП кристаллов, была исследована эффективность ПГС преобразования кристаллами ZGP излучения накачки. В наших ранних работах эффективность преобразования ( $\eta$ ) излучения накачки стандартных (с углами синхронизма  $\theta = 54,5$  гр,  $\varphi = 0$  гр.) оптических элементов производства ООО «ЛОК», г. Томск, достигало  $\eta \sim 28$  %. Эти элементы преобразуют излучение накачки с длиной волны 2,097 мкм в широкополосную область от 3,5 до 5 мкм. В экспериментах по определению эффективности генерации ПГС с нанесенными интерференционными покрытиями нами были исследованы два образца (№ 1, 3).

Установлено, что эффективность преобразования образцом № 1 достигает значений  $\eta = 35$  %, а средняя мощность генерации достигает порядка 3 Ватт, при средней мощности накачки порядка 8 Ватт. Таким образом, можно отметить рост эффективности преобразования при использовании разработанного шестислойного покрытия на основе материалов Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> на  $\Delta\eta = 7$  %. Дальнейшее повышение мощности в резонаторе вызывает оптический пробой образца, и, следовательно, мы считаем, что это максимальная эффективность, которую можно получить на кристалле с данным типом покрытий. Максимально достигнутое значение эффективности преобразования образцом № 3  $\eta = 50$  %. При этом максимальная средняя мощность генерируемого излучения в диапазоне 3-5 мкм составляет 7 Ватт. А мощность накачки при этом составляет порядка 14 Ватт. Полученное значение эффективности преобразования для образца № 3 выше, чем для образца № 1 на  $\Delta\eta = 15$  %, а прирост по сравнению с предыдущими экспериментами составляет порядка  $\Delta\eta = 22$  %. Таким образом, можно отметить, что нанесение просветляющих покрытий позволяет добиться большей эффективности ПГС преобразования, по сравнению с непросветленным образцом более чем в два раза. Оксидное покрытие на основе слоев TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> образец № 3 позволяет получить эффективность преобразования излучения на уровне  $\eta = 50$  %. При этом образец № 1 с оксидным покрытием на основе Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> показывает худший результат с эффективностью  $\eta = 35$  %. Однако, нанесение просветляющих покрытий в рамках реализации проекта позволило получить прирост в эффективности преобразования излучения на 22 %, при ожидаемых 10 %.

Также в рамках проекта проведено экспериментальное исследование широкополосной ГСЧ излучения СО-лазера в образцах ZGP с просветляющим интерференционным покрытием и без него. В этих экспериментах использовалась более мягкая фокусировка линзой с фокусным расстоянием 85 мм. Средняя и пиковая мощность излучения составляла 90 мВт и 3,3 кВт, соответственно. Эффективность ГСЧ, определяемая как отношение средней мощности излучения ГСЧ на выходе из кристалла к величине средней мощности излучения СО-лазера, в просветлённом образце достигала 4,8 %, и оказалась в 2 раза выше, чем в непросветленном кристалле. Спектральные характеристики ГСЧ для просветленного и непросветленного образцов оказались одинаковыми: ~110 линий в интервале длин волн 2,5-3,0 мкм. Таким образом, установлено, что разработанное широкополосное просветляющее покрытие повышает ПЛИП, повышает эффективность ГСЧ СО лазера в 2 раза (за счёт снижения потерь на Френелевское отражение), при этом не вносит искажений в спектральные характеристики преобразованного излучения.

Далее исследована двухпроходная схема широкополосной ГСЧ неселективного СО лазера с тем же образцом кристалла ZGP. Максимальное значение эффективности ГСЧ достигало ~10 %, что в 2,5 раза выше, чем при использовании непросветленного образца ZGP в такой же оптической схеме. Также результатом эксперимента стал вывод о возможности управления спектром ГСЧ путем изменения углов падения излучения СО-лазера на кристалл ZGP для прямого и обратного луча.