

УДК 621.923.75:535.21

Юдин Н. Н.^{1,2}, Худолей А. Л.³, Зиновьев М. М.^{1,2}, Подзывалов С. Н.¹, Слюнько Е. С.¹,
Кузнецов В. С.¹, Городкин Г. Р.³, Кумейша П. Н.³, Лысенко А. Б.¹

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА $ZnGeP_2$ НА ПОРОГ ЕГО ОПТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

¹Национальный исследовательский томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

³Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Для финишной доводки рабочей поверхности монокристалла $ZnGeP_2$ применена магнитореологическая обработка. Получены образцы с нангстремным уровнем шероховатости рабочих поверхностей монокристалла. Проведены экспериментальные испытания по определению порога оптической стойкости. Показано, что при нангстремном уровне шероховатости на величину оптического пробоя наибольшее влияние оказывает концентрация объемных дефектов «вышедших» на поверхность кристалла.

В настоящее время наиболее мощные параметрические генераторы света (ПГС) в диапазоне длин волн 3,5-5,0 мкм созданы на основе нелинейно-оптических монокристаллов $ZnGeP_2$ (ZGP) [1]. Данные ПГС способны генерировать излучение со средней мощностью до 160 Вт или импульсной энергией до 200 мДж при длительности импульсов 20...60 нс и частоте следования от единиц Гц до 100 кГц [2]. Однако, долговременная работа без отказа мощных ПГС на основе ZGP ограничивается оптическим пробоем – Laser-induced damage threshold (LIDT) поверхности данного материала. В связи с этим, потенциал практического использования данных ПГС среднего инфракрасного (ИК) диапазона связан, в частности, с необходимостью совершенствования методик обработки рабочих поверхностей кристаллов с целью повышения их порога оптического пробоя.

Одним из перспективных методов повышения качества поверхности является магнитореологическая обработка / полирование (МРО) [3], которое, в том числе, все чаще используют при финишной доводке лазерных кристаллов для повышения порога лучевой стойкости и снижения уровня шероховатости. Представленные в данной работе исследования посвящены проверке возможности использования МРО в качестве метода удаления дефектного слоя после тонкого полирования и снижения уровня шероховатости поверхности монокристалла ZGP. Оценивалось влияние магнитореологической обработки на порог оптического пробоя ZGP.

Для проведения исследований были использованы 2 образца монокристалла ZGP: образец №1 и №2 с размерами 6×6×20 мм³. Исследуемые образцы были вырезаны из монокристаллической були ZGP (производства ООО «ЛЮК», г.Томск, Российская Федерация) под углами $\theta = 54,5^{\circ}$ и $\varphi = 0^{\circ}$ относительно оптической оси. Начальная полировка рабочих поверхностей, обоих исследуемых образцов производилась на полировально-доводочном станке 4-ПД-200 (СЗОС, г. Сморгонь, Республика Беларусь). Начальная обработка состояла в полировке на батистовом полировальнике с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 0,5/0 (средний размер зерна 270 нм). При этом съем материала составлял ~ 50 мкм с каждой стороны, что позволяло убрать трещиноватый слой, образующийся в процессе резки кристалла на ориентированные пластинки и их предварительной шлифовки. Далее образцы дополнительно обрабатывались на батистовом полировальнике с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 0,25/0. После этого образцы дополировывались на смоляном полировальнике, изготовленном из полировальной смолы с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 0,25/0.

Рабочие поверхности образца № 2 дополнительно подвергались МРО с двух торцов. МРО осуществляли на 5-ти координатной установке с ЧПУ УМО-00.00.000 (ИТМО, Минск, Республика Беларусь). Для МРО использовали жидкость на неводной основе с магнитными частицами из карбонильного железа добавлением наноалмазов. С целью повышения произ-

водительности съема материала с поверхности была применена двухстадийная МРО, включающая жесткий и мягкий режимы, отличающиеся величиной зазора между рабочим колесом и обрабатываемой деталью. На установке образец кристалла ZGP закрепляли в держатель, выполненный из фторопласта.

Шероховатость поверхности образцов № 1 и № 2 измеряли на 3D оптическом профилометре MicroXAM-800 (KLA-Tencor, США). Образец №2 измеряли дважды до и после МРО. Для всех образцов использовался фазовый режим PSI и объектив Nikon X50. Поле зрения составляло 116x152 мкм. Выполнялись оценки следующих параметров по ИСО 4287-2014: среднеквадратичной глубины шероховатости (R_q), среднеарифметического отклонения профиля шероховатости от средней линии (R_a) и суммы средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля (R_z).

Результаты измерения параметров шероховатости образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры шероховатости поверхности образцов ZGP			
Параметры шероховатости	Образец 1	Образец 2	
		исходная	после МРО
R_z , нм	1,56	1,46	1,06
R_a , нм	0,227	0,218	0,154
R_q , нм	0,289	0,274	0,193

Анализ топографии поверхности образца № 1 и образца № 2 полированных по традиционной технологии показал, что рельеф поверхностей сформирован под воздействием разнонаправленного движения рабочего инструмента, имеются единичные протяжённые царапины глубиной до 1,3 нм. Топография поверхности образца № 2 после МРО не содержит указанных царапин и представлена менее текстурированным профилем, сформированным под воздействием магнитореологической жидкости (рисунок 1). У поверхности после МРО наблюдается значительное улучшение параметров шероховатости в 1,37-1,42 раза. В отличие от [4], где авторы достигли нанометрового и субнанометрового уровня шероховатости поверхности образцов кристалла ZGP, у образцов, исследуемых в данной статье, зафиксирован агнстремный уровень шероховатости: R_a 2,27Å для образца № 1 и R_a 1,54Å для образца № 2 после МРО.

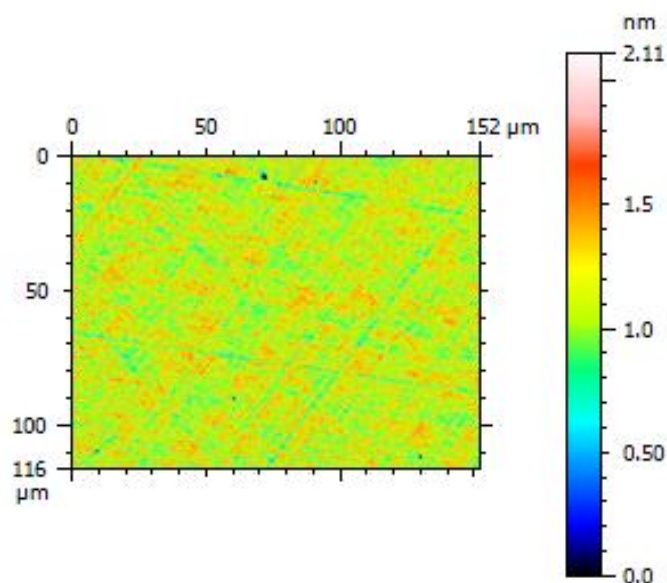


Рисунок 1 – Топография поверхности образца № 2 после МРО

Съем материала после МРО с поверхностей образца № 2 составил: сторона А – 6,95 мкм, сторона В – 9,50 мкм. Фактически при МРО обрабатывалась площадь не 6x6 мм, а

22x20 мм, поэтому общее время обработки стороны А составило – 435 мин, а стороны В – 345 мин. Если из общего времени МРО вычесть время, связанное с разгоном и реверсом рабочего инструмента, то эффективное время нахождения рабочего инструмента на поверхности кристалла составило 8,2% от общего времени: для стороны А – 28 мин, В – 36 мин. Таким образом материал показал хорошую полируемость. Для повышения эффективности использования оборудования, целесообразно в дальнейшем предусмотреть групповой тип обработки кристаллов ZGP при МРО. Дополнительно, применение МРО позволило более точно охарактеризовать возможные структурные дефекты, вышедшие на поверхность монокристалла имеющие размер ~ 0,5-1,5 мкм.

На рисунке 2 представлены результаты исследования LIDT образца № 1 (полированного по классической технологии) и образца № 2 сразу после МРО полировки.

Несмотря на то, что у образца, подвергнувшегося МРО наблюдалось существенное улучшение параметров шероховатости поверхности по сравнению с образцом, отполированным по классической технологии LIDT, остался практически неизменным. Отсутствие разницы в пороге пробоя для двух образцов, вероятнее всего связано с тем, что значение LIDT при ангстремных параметрах шероховатости поверхности определяется в большей степени уже не качеством полировки, а физическими ограничениями структурного строения кристалла. Выдвинуто предположение, что на LIDT оказывали наибольшее влияние дислокации или объемные дефекты «вышедшие» на полированную поверхность, чем уровень шероховатости.

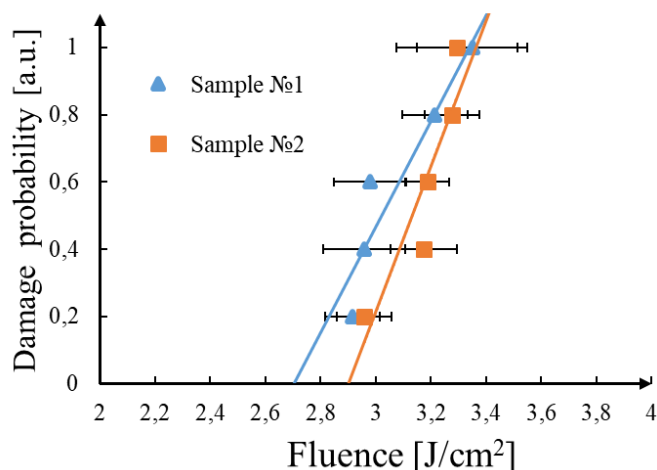


Рисунок 2 – Зависимость вероятности оптического пробоя образцов № 1 (Δ) и № 2 (□) от плотности энергии падающего лазерного излучения

Таким образом при ангстремном уровне шероховатости решающим фактором, влияющим на величину LIDT, является концентрация объемных дефектов «вышедших» на поверхность кристалла.

Список литературы

1. Schunemann P.G., Zawilski K.T., Pomeranz L.A., Creeden D.J., Budni P.A. Advances in nonlinear optical crystals for mid-infrared coherent sources // Journal of the Optical Society of America B. - 2016. - V. 33. - N. 11. - P. D36-D43.
2. Qian C., Yao B., Zhao B., Liu G., Duan X., Ju Y., Wang Y. High-speed robust polarization modulation for quantum key distribution // Optics Letters. - 2019. - V. 44. - N. 21. - P. 5262-5265.
3. Sutowska M., Sutowski P. Contemporary applications of magnetoreological fluids for finishing process // Journal of Mechanical and Energy Engineering. - 2017. - V. 1 (41). - No. 2. - P. 141-152.
4. Z. Lei, C. Zhu, C.Xu, B. Yao, C. Yang Growth of crack-free ZnGeP₂ large single crystals for high-power mid-infrared OPO applications // Journal of Crystal Growth. - 2014. - V.389. - P. 23-29.