

УДК 535.21

Липатьева Т. О.¹, Федотов С. С.¹, Липатьев А. С.¹, Каратеев И. В.², Сигаев В. Н.¹

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МОНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

В работе продемонстрирована возможность использования метода фемтосекундной лазерной сварки кристаллов YAG и Nd:YAG с созданием соединения с прочностью 110 ± 20 МПа, выдерживающего перепад температур в 1000°C и перспективного для применений в качестве пассивного теплоотвода лазерной среды.

Высокомощные твердотельные лазеры находят широкое применение в современных технологиях: от сенсорики до космических приборов. Однако из-за термооптических эффектов в активной среде мощных лазеров, сложно сочетать высокую мощность с превосходным качеством луча из-за возникающих в ходе работы температурных градиентов, которые приводят к изменению показателя преломления и тепловому линзированию, абберациям и двулучепреломлению [1]. Основным способом эффективного снижения вклада термооптических эффектов в искажение выходного луча и износ активного элемента является организация охлаждения активной среды: обдув, криогенное охлаждение, монтаж теплоотводов и т.д. [2]. Традиционно для монтажа теплоотводов используют технологии диффузионного контакта, который требует высочайшего качества поверхности [2]. Этому недостатка лишен развивающийся в последнее время метод лазерной сварки [3,4], позволяющий осуществлять соединение различных материалов даже с низким качеством поверхности [5]. В настоящей работе с использованием способа фемтосекундной лазерной сварки создано прочное термостойкое соединение активной лазерной среды с теплоотводом, где в качестве теплоотвода служит легированный кристалл YAG, а в качестве активной лазерной среды – Nd:YAG.

Для экспериментов по сварке использовали фемтосекундную лазерную систему Pharos SP (Light Conversion Ltd), генерирующую линейно поляризованные импульсы длительностью 180 фс на длине волны 1,03 мкм, с энергией импульса 0,6 - 1 мкДж и частотой следования импульсов 500 кГц. Лазерный пучок фокусировали на контактной поверхности двух свариваемых кристаллов объективом Olympus 20X (N.A. = 0,45) (Рисунок 1б).

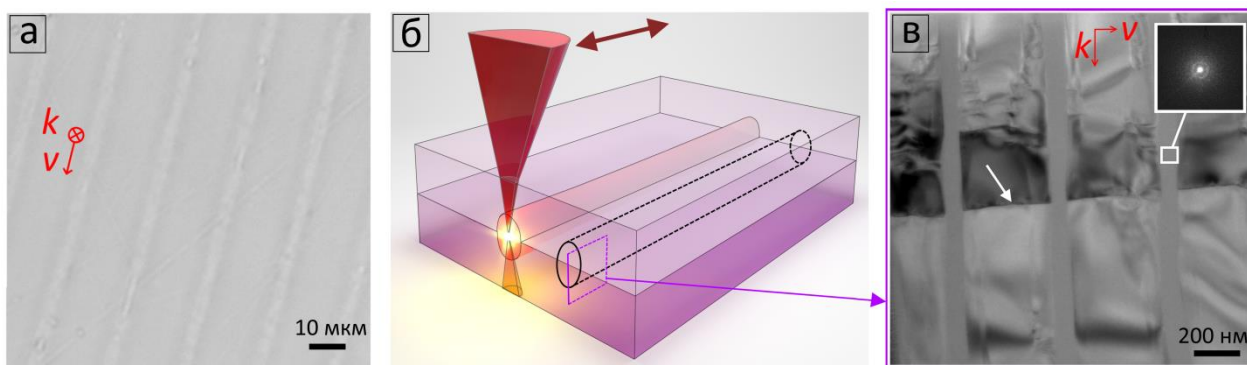


Рисунок 1 – (а) Оптическая микрофотография сварного шва, вид сверху. Красные стрелки показывают направление перемещения v и распространения лазерного луча k . (б) Схема фокусировки лазерного пучка. Фиолетовая рамка показывает направление вырезания ламели для просвечивающей электронной микроскопии. (в) ПЭМ-изображение бокового среза сварного шва.

На вставке представлена дифракционная картина выделенной области. Белые стрелки показывают границу соединения двух образцов кристаллов. Красные стрелки показывают направление перемещения v и распространения лазерного луча k .

Образец, состоящий из двух полированных кристаллических пластин YAG и Nd:YAG (0,4 at.%), приведенных в частичный оптический контакт, помещали на моторизованную платформу Aerotech ABL1000 без использования прижимного устройства и перемещали относительно лазерного пучка с помощью моторизованной 3D платформы Aerotech ABL1000 со скоростью до 1 мм/с по круговой траектории с расстоянием между сварными швами 10 мкм в направлении, перпендикулярном направлению поляризации лазерного пучка. Для анализа сварных соединений использовали оптический микроскоп Olympus BX51, просвечивающий электронный микроскоп Titan 80-300 (Thermo Fisher Scientific) и испытательную разрывную машину Shimadzu AGS-X. Испытания на термостойкость проводили в ходе резкого нагрева до температур от 400 до 1000 °С и охлаждения на воздухе при комнатной температуре.

Полученные при энергиях импульса до 0,8 мкДж сварные швы представляли собой гладкие однородные треки шириной около 2 мкм без видимых трещин (Рисунок 1а). Дальнейшее повышение энергии импульса приводило к формированию трещин вдоль сварных швов. Благодаря близости коэффициентов термического расширения соединяемых материалов и оптимизации параметров лазерного излучения с целью предотвращения образования трещин при режиме 500 кГц, 0,7 мкДж удалось добиться высокой прочности полученного соединения в пересчете на единицу площади сварной площадки: 110 ± 20 МПа. Исследование методами просвечивающей электронной микроскопии сварного шва, записанного при оптимизированных параметрах лазерного излучения, показало, что сварное соединение обеспечивают периодические наноплоскости толщиной около 100 нм, разделенные кристаллическими областями с периодом около 400 нм (Рисунок 1в). Согласно дифракционной картине, наноплоскости представляют собой аморфизированные области сварного шва (Рисунок 1в). При этом кристаллическая часть сварного соединения содержит нанотрещины, возникновение которых связано с формированием аморфных областей, имеющих больший объем. Соединение, сформированное при данном режиме, способно выдерживать резкий нагрев до 1000 °С с последующим резким охлаждением на воздухе. Данные значения коррелируют с ранее полученными для соединения двух допированных кристаллов Nd:YAG [4]. Несмотря на высокие значения прочности сформированного соединения, сохраняются возможности по её увеличению при дальнейшей оптимизации параметров лазерного облучения, которые позволили бы увеличить ширину аморфных «мостиков», уменьшить их периодичность или формировать полностью аморфный сварной шов.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования метода фемтосекундной лазерной сварки кристаллов YAG и Nd:YAG с созданием прочного термостойкого соединения, перспективного для применений в качестве метода монтажа теплопроводов твердотельных лазеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РФФ №22-29-00838).

Список литературы

1. Frede M. et al. High power fundamental mode Nd:YAG laser with efficient birefringence compensation // Optics Express – 2004. – Vol. 12. № 15. P. 3581
2. Sulc J., et al. Comparison of different composite Nd:YAG rods thermal properties under diode pumping // Solid State Lasers XI – 2002. – Vol. 4630. P. 128
3. Miyamoto I. et al. Advances of laser welding technology of glass-science and technology // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2020. – Vol. 15. №2
4. Lipateva T. O. et al. Robust and adhesive-free joint of Nd: YAG crystals by femtosecond laser-assisted welding // Optics & Laser Technology. – 2022. – Vol. 146. P. 107594.
5. Carter R. M. et al. Towards industrial ultrafast laser microwelding: SiO₂ and BK7 to aluminum alloy // Applied optics. – 2017. – Vol. 56. № 16. P. 4873-4881.