

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА YAG ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: МОРФОЛОГИЯ КРАТЕРОВ И ДЕФОРМАЦИЯ МАТЕРИАЛА

Н.Е. Быковский¹⁾, Ю.В. Сенатский¹⁾, Е.В. Заведеев^{2, 3)}, В.Г. Ральченко^{2, 3)}

¹⁾Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский пр., 53, Москва, 119991, Россия

²⁾Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия

³⁾Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Каширское шоссе, 31, Москва, 115409, Россия

nbykovsky@sci.lebedev.ru, senatsky@sci.lebedev.ru, zavedeev@nsc.gpi.ru, ralchenko@nsc.gpi.ru

Исследованы кратеры на поверхности пластинки из кристалла YAG при облучении ее наносекундными лазерными импульсами с интенсивностью 10^9 - 10^{10} Вт/см² и широким (≈ 500 Å) спектром. Обсуждается механизм формирования кратеров в результате пластической деформации поверхности в процессе лазерного воздействия. Предложенный механизм учитывает особенности протекания нелинейных эффектов при воздействии широкополосного излучения на среду: при ВРМБ накачки акустические волны трансформируются в ударные волны, а на их фронтах развивается ВКР накачки. В результате точечные дефекты кристаллической решетки, образующиеся на фронтах ударных волн, увлекаются по направлению накачки, что приводит к деформации поверхности кристалла, протекающей с высокой скоростью.

Введение

В настоящее время значительное внимание уделяется исследованиям активных сред на основе кристаллов и керамики Nd:YAG и Yb:YAG, которые находят применение в мощных лазерах [1-6]. Для экспериментов по взаимодействию наносекундных лазерных импульсов с кристаллом YAG и другими материалами в качестве источника излучения нами использовался лазер на центрах окраски (ЛЦО) LiF:F₂⁺ [7-11]. 20-30 нс импульсы (энергия до 100 мДж) широкополосного (~ 500 Å с максимумом при $\lambda \approx 0.91$ мкм) излучения ЛЦО фокусировались в пятно \varnothing 100-300 мкм на поверхность образцов кристаллов YAG, Yb:YAG, кварца, LiF. Подобный источник импульсов широкополосного излучения в исследованиях по лазерному разрушению кристаллов был применен нами впервые. Морфология структурных изменений на поверхности образцов из кристалла YAG под действием импульсов низкокогерентного излучения ЛЦО отличалась от разрушений с признаками плавления и абляции вещества, которые наблюдаются нередко в экспериментах по воздействию на образцы импульсов от традиционных когерентных источников, таких как Nd:YAG лазер. В настоящей работе сообщается о результатах обследования на оптическом профилемере и микроскопе кратеров на поверхности кристалла YAG, а также на поверхности образцов Yb:YAG, кварца, LiF, возникших под действием сфокусированного на образцы излучения ЛЦО с плотностью мощности 10^9 - 10^{10} Вт/см². Обсуждается механизм деформации поверхности и формирования кратеров в кристаллах.

Результаты эксперимента

Были получены микрофотографии и профили сканирования нескольких кратеров \varnothing 50-350 мкм и глубиной до 3 мкм на поверхности полированных пластин из кристалла YAG (толщина d=4мм) и кристалла Yb:YAG (20% концентрация Yb, d=1мм), образованных импульсами ЛЦО с энергией до 60 мДж. На рис. 1 представлены фото-

графии кратеров под микроскопом, а на рис. 2 – фотографии и результаты сканирования кратеров на оптическом профилемере ZYGO New View-5000.

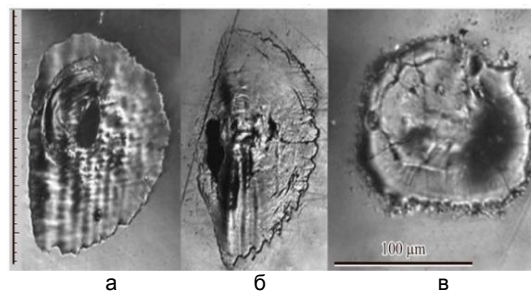


Рис. 1. Микрофотографии кратеров на поверхности кристаллов YAG (а, б, шкала - 11,8 мкм на 1 деление) и Yb:YAG (в).

Вытянутая форма некоторых кратеров связана с аберрациями пучка из-за наклона ($\sim 10^0$) линзы ($f \approx 12$ см), фокусировавшей излучение на образцы. Примечательные особенности кратеров на поверхности YAG: наличие по их периметру бортика высотой 200-500 нм и шириной 5-10 мкм, волнообразный рельеф внутри кратеров, а также отсутствие признаков плавления материала в кратере и выплесков расплава из кратера. На рис. 1б за пределами кратера на поверхности YAG видны царапины, имеющие продолжение внутри кратера, что указывает на отсутствие плавления или испарения материала на этих участках. При плавлении силы поверхностного натяжения сгладили бы поверхность, испарение также привело бы к исчезновению следов царапин в кратере. Морфология кратеров в Yb:YAG подобна морфологии кратеров в YAG. Однако, в отличие от YAG, в Yb:YAG при острой фокусировке излучения ЛЦО наблюдались кратеры с явными признаками плавления, трещинами, возникшими при остывании расплава, каплями расплава за пределами кратеров (рис. 1в), чего не наблюдалось в YAG. В Yb:YAG с 20% концентрацией коэффицици-

ент поглощения излучения ЛЦО при переходах с основного уровня иона $\text{Yb}^2\text{F}_{7/2}$ на метастабильный $^2\text{F}_{5/2}$ составляет $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ [7]. При этом около 10% энергии накачки переходит в тепло при переходах между штарковскими компонентами этих уровней. Дополнительное (по сравнению с YAG) выделение тепла в Yb:YAG приводило к плавлению материала в кратере и выбросу расплава за его пределы (рис. 1в). В кристалле YAG, таким образом, изменения структуры поверхности происходили без плавления и наступали при интенсивностях излучения, меньших интенсивностей, вызывавших плавление и абляцию.

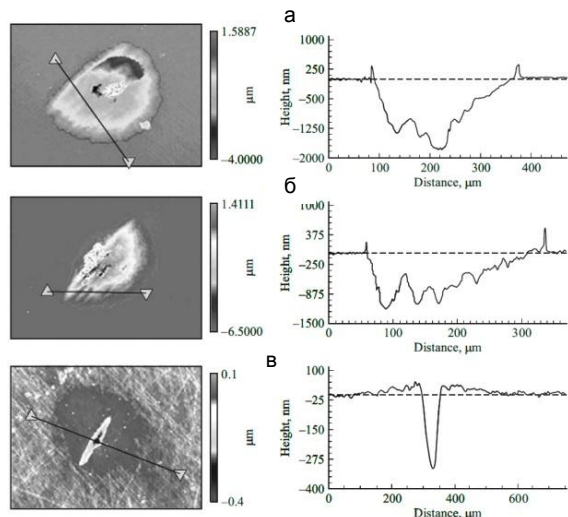


Рис. 2. Микрофотографии кратеров на поверхности кристалла YAG и их профилограммы вдоль прямых, отмеченных треугольниками; (а) и (б) соответствуют кратерам на рис. 1(а, б); кратер (в) образован импульсом с энергией ≈ 10 мДж; пунктирная линия - невозмущенная поверхность кристалла.

Отсутствие признаков плавления на поверхности кристалла YAG позволяет предположить, что структурные изменения (возникновение кратера, формирование бортика, рельефа внутри кратера) обусловлены не плавлением или испарением, а скорее перемещениями вещества, т.е. механизмом пластической деформации кристалла. Перемещение вещества может происходить как без изменения объема (за счёт скольжения дислокаций), так и с изменением объема при структурной перестройке кристаллической решётки - фазовом переходе [12]. На перемещение вещества затрачивается энергия. В случае прозрачного для падающего лазерного излучения кристалла энергия ему может быть передана только за счёт нелинейного взаимодействия излучения со средой. Такое взаимодействие было зарегистрировано для всех образцов из кристаллов YAG, Yb:YAG, кварца, LiF [8, 11]. Сопоставление параметров рассеянного кристаллами излучения с параметрами импульсов ЛЦО позволили связать рассеяние с процессами ВРМБ (вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна) и ВКР (вынужденного комбинационного рассеяния) излучения ЛЦО (накачки) [8, 11].

Взаимодействие широкополосной накачки с кристаллом

Предлагается следующее описание взаимодействия широкополосной накачки с кристаллами и объяснение продавливания поверхности в кристалле YAG. ВРМБ широкополосного излучения ЛЦО в кристаллах происходило с формированием периодической последовательности ударных волн, на фронтах которых происходило ВКР накачки [8, 11]. За счёт ВКР атомам среды передаются импульсы, вырывающие их из кристаллической решётки. Образовавшиеся междоузельные атомы подхватываются периодическими ($T \sim 50$ пс) бегущими по направлению накачки ударными волнами и загоняются вглубь кристалла, разогревая тонкий слой под поверхностью кристалла и увеличивая давление в нем. Оценка скорости пластической деформации для кристалла YAG - $1,5 \cdot 10^4$ см/с, что составляет заметную величину от скорости звука в этом кристалле. Поскольку продавливание поверхности кристалла YAG мы связываем с воздействием акустических волн, можно предположить, что интерференция этих волн (связанная с неоднородной структурой пятна накачки) создавала волнистую поверхность внутри кратера. Избыточное давление в области облучения в сочетании с высокочастотными периодическими нагрузками способствовало выдавливанию части материала вдоль границы области возбуждения с формированием бортика (рис. 2а, б).

В кристалле YAG при температуре $T \sim 1000^\circ$ и давлении $P \sim 2,5$ ГПа возможен фазовый переход по схеме: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}(\text{YAG}) \rightarrow 3\text{YAlO}_3(\text{YAP}) + \text{Al}_2\text{O}_3$ с уменьшением объема на $\sim 10\%$ [13]. Такие условия, как показывают оценки, достигались в тонких слоях под поверхностью кристалла YAG [14]. Уплотнение кристалла при фазовом переходе в слое 10 мкм на 10% обеспечивает продавливание поверхности ≈ 1 мкм, наблюдаемое на эксперименте (рис. 2а, б). При интенсивной накачке наблюдались кратеры, объем которых был во много раз больше выдавливаемого вокруг кратера бортика. Такая морфология кратера может свидетельствовать о фазовом переходе. При малых интенсивностях накачки объем кратера примерно совпадал с объемом материала, выдавливаемого на поверхности вокруг кратера (рис. 2в). При малой энергии накачки, когда параметры фазового перехода в YAG не достигались, скопившиеся в глубине кристалла междоузельные атомы за счёт дополнительного вносимого ими объема создавали внутренние напряжения, приводящие к выпучиванию поверхности вокруг кратера (рис. 2в).

В кристаллах кварца и LiF, облучавшихся в аналогичных условиях импульсами ЛЦО с энергией до 60 мДж, признаков плавления материала, также как и в кристалле YAG, отмечено не было. Не было отмечено и продавливания поверхности образцов кварца и LiF (рис. 3). Характерная морфология структурных изменений для кварца - растрескивание области облучения в виде розетки из лепестков, а для кристалла LiF - растрескивание поверхности вокруг области облучения в виде прямоугольной сетки (рис. 3). Таким образом, для кристаллов кварца и LiF, обладающих

меньшей, чем YAG, стойкостью к термомеханическим напряжениям, в отсутствие фазового перехода возникающие в слоях под поверхностью напряжения приводили к растрескиванию поверхности этих кристаллов.

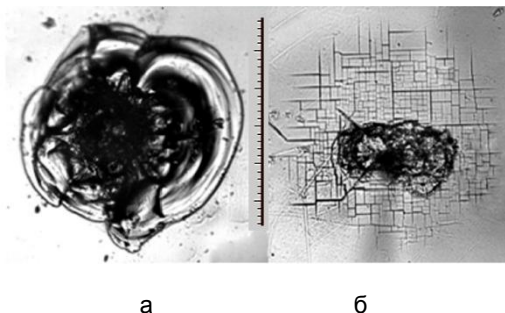


Рис. 3. Растрескивания внутри и вне кратеров на поверхности кристаллического кварца (а) и на поверхности кристалла LiF (б). Масштаб — 11.8 мкм на деление.

Заключение

Представленные данные позволяют предположить, что при взаимодействии импульса широкополосного излучения ЛЦО длительностью 20–30 нс с плотностью мощности 10^9 – 10^{10} Вт/см² с кристаллом YAG образование кратеров на поверхности этого кристалла происходило не в результате плавления и абляции, а в результате пластической деформации материала, вызванной смещением атомов в глубь кристалла с последующим снятием возникших напряжений за счет полиморфного перехода в среде или за счет выпучивания поверхности образца.

Список литературы

1. Sanghera J., Kim W., Villalobos G., Shaw B., Baker C., Frantz J., Sadowski B. and Aggarwall. // *Materials*. 2012. № 5. P. 258.
2. Senatsky Yu., Shirakawa A., Sato Y., Hagiwara J., Lu J., Ueda K., Yagi H., Yanagitani T. // *Laser Physics Letters*. 2004. № 3. P. 500.
3. Bisson J., Feng Y., Shirakawa A., Yoneda H., Lu J., Yagi H., Yanagitani T. and Ueda K. // *Jap. J. Appl. Phys.* 2003. V. 42. P. L1025.
4. Zelmon D., Schepler K., Guha S., Rush D., Hegde S., Gonzalez L. and Lee J. // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5647. P. 255.
5. Xu S., Qiu J., Jia T., Li Ch., Sun H., Xu Zh. // *Optics-Communications*. 2007. V. 274. P. 163.
6. Smith A. and Do B. // *Appl. Optics*. 2009. V. 48. P. 3509.
7. Басиев Т.Т., Быковский Н.Е., Конюшкин В.А., Сенатский Ю.В. // *Квантовая электроника*. 2004. Т. 34. С. 1138.
8. Быковский Н.Е. // *Препринт ФИАН*. 2005. №16.
9. Быковский Н.Е. // *Препринт ФИАН*. 2006. №36.
10. Быковский Н.Е., Сенатский Ю.В. // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38. С. 813.
11. Vykovsky N. and Senatsky Yu. Excitation of Periodical Shock Waves in Solid-State Optical Media (Yb:YAG, Glass) at SBS of Focused Low-Coherent Pump Radiation: Structure Changes, Features of Lasing (in Acoustic Waves: from Microdevices to Helio-seismology) Ed. BeghiMG. InTech. 2011. 369 p.
12. Косевич А.М. Физическая механика реальных кристаллов. - Киев: Наукова думка, 1981. 327 с.
13. Hreniak D., Gierlotka S., Łojkowski W., Stręk W., Mazur P. and Fedyk R. // *Solid State Phenomena*. 2005. V. 106. P. 17.
14. Быковский Н.Е., Заведеев Е.В., Сенатский Ю.В. // *Препринт ФИАН*. 2014. № 20.

CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE YAG CRYSTAL SURFACE UNDER THE ACTION OF NANOSECOND PULSES OF BROADBAND LASER RADIATION: MORPHOLOGY OF CRATERS AND MATERIAL DEFORMATION

N.E. Bykovsky¹⁾, Yu.V. Senatsky¹⁾, E.V. Zavedeev^{2, 3)}, V.G. Ralchenko^{2, 3)}

¹⁾P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,
53 Leninskiy Prospekt, Moscow, 119991, Russia

²⁾A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,
38 Vavilova Str., Moscow, 119991, Russia

³⁾National Research Nuclear University MEPhI,
31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russia

nbykovsky@sci.lebedev.ru, vg_ralchenko@mail.ru, senatsky@sci.lebedev.ru

A beam of broadband (~500 Å) radiation from LiF:F₂⁺ color center laser (pulses with a duration of 20–30 ns and energy of up to 100 mJ in the spectral range 0.89–0.95 μm with the maximum at λ≈0.91 μm) was focused to a spot with a diameter of 100–300 μm (radiation intensity of 10⁹–10¹⁰ W/cm²) on the surface of YAG crystal sample. It was noticed that the morphology of structural changes on the YAG crystal surface under the action of color center laser (CCL) radiation of limited coherence differ from that observed in the cases of destruction with indications of melting and ablation of material, which often take place under the action on the crystal samples of pulses of traditional coherent laser sources such as the Nd:YAG laser. The mechanism of crater formation as a result of plastic deformation of the surface during the laser action has been discussed. The proposed mechanism takes into account nonlinear effects under the action of a broadband radiation on the medium. During the stimulated Brillouin scattering of pump CCL radiation, the induced acoustic waves are transformed into shock waves on whose fronts the stimulated Raman scattering develops. As a result, defects of the crystal lattice are dragged in the direction of pumping, which leads to deformation of the crystal surface, proceeding at a high rate. The role of a phase transition with the densification of the material which could occur at these conditions inside the YAG crystal surface layer before the melting of the crystal is discussed.