

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_42

УДК 535.8

ГРНТИ 29.31.27

Исследование оптических резонансов, возникающих в рассеянном поле излучения волоконного Yb-лазера в прозрачных диэлектрических средах

Осипов В. В., Тихонов Е. В., Платонов В. В., Лисенков В. В., Кременецкий М. В.

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106,
Институт электрофизики УрО РАН

e-mail: tikhonov@iep.uran.ru

При помощи численного моделирования исследовано рассеяние излучения волоконного лазера в среде из прозрачных диэлектрических частиц. Моделирование проведено для ряда материалов, имеющих разброс показателя преломления в широком диапазоне (MgF_2 , CaF_2 , SiO_2 , BaF_2 , MgAl_2O_4 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , YSZ, TiO_2). Обнаружено, что в пределах ширины спектральной линии излучения $\lambda = (1,07 \pm 0,00325)$ мкм максимальная интенсивность может варьироваться в широком диапазоне значений, что качественно согласуется с большим разбросом экспериментально измеренных времён задержки появления лазерного факела. Показано, что локальный максимум является источником первоначального нагрева материала, что способствует потере последним прозрачности и его дальнейшему объёмному разрушению.

Ключевые слова: лазерная абляция, волоконный иттербиевый лазер, рассеяние Ми, метод конечных элементов, время задержки появления лазерного факела.

Метод лазерной абляции сегодня активно используется для получения нанопорошков, нужных для синтеза оптической керамики и создания ячеек ТОТЭ [1, 2]. При помощи волоконного лазера ($\lambda=1,07$ мкм) нами уже синтезировались порошки типа Y_2O_3 , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , YSZ и др [3–5]. Эти материалы обладают высокой прозрачностью на $\lambda=1,07$ мкм. Было показано, что важную роль при испарении мишени, спрессованной из микронных частиц, играет рассеивание излучения на дефектах кристаллической структуры, зависящее от показателя преломления материала n . Так, CaF_2 и 1% Nd: Y_2O_3 имеют близкие показатели поглощения ($\sim 1 \dots 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$), но разный n (1,43 для CaF_2 и 1,90 для Y_2O_3). При равной мощности излучения волоконного лазера 600 Вт производительность получения нанопорошка 1% Nd: Y_2O_3 была 23 г/час, а мишень из CaF_2 даже не испарялась, что представляет большой научный и прикладной интерес.

В докладе приводятся результаты численного моделирования рассеяния излучения волоконного иттербиевого лазера в мишени из сферических частиц диаметрами 0,4...3 мкм при плотности упаковки $\sim 55\%$ и её нагрева. Модель основана на самосогласованном решении уравнения Гельмгольца и уравнения теплопроводности. Расчёт проводился для материалов с различными n : MgF_2 , CaF_2 , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , Y_2O_3 , YSZ и TiO_2 . Рассчитанное распределение электромагнитного поля имеет сложную структуру с

локальными максимумами интенсивности, обусловленными интерференцией падающего, отражённого и преломлённого излучения. Интенсивность в них зависит от диаметра частиц D , их показателя преломления n и длины волны излучения λ . Варьирование длины волны в пределах ширины спектральной линии излучения ($1,07 \pm 0,00325$) мкм показало существование разброса значений максимальной интенсивности для всех материалов при постоянной интенсивности падающего излучения $0,46 \text{ МВт/см}^2$. Концентрация излучения в локальном максимуме может облегчить инициирование начального нагрева материала. На примере MgAl_2O_4 показано, что распределение температуры в мишени коррелирует с распределением электромагнитного поля. При этом наибольшие значения температуры реализуются в участках, соответствующих локальным максимумам. Вышенаписанное качественно объясняет разброс времён задержки появления лазерного факела: для каждого участка мишени реализуется случайное соотношение величин D и λ , что приводит к различиям в динамике нагрева материала, и, как результат, к существенному разбросу времён задержки. Кроме того, с ростом показателя преломления величина разброса максимальной интенсивности также возрастает: для CaF_2 диапазон разброса составил $8,44 \dots 11,4 \text{ МВт/см}^2$, а для TiO_2 – уже $6,89 \dots 161,4 \text{ МВт/см}^2$, что согласуется с уменьшением времени задержки при росте n .

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 20-08-00054 А и №20-38-70022.

Список литературы

1. Осипов В. В., Лисенков В. В., Платонов В. В., Тихонов Е. В. Процессы взаимодействия лазерного излучения с пористыми прозрачными материалами при их абляции. Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 3. С. 235–243.
2. Osipov V. V., Solomonov V. I., Platonov V. V., Tikhonov E. V., Medvedev A. I., Podkin A. V. Synthesis of $\text{Fe:MgAl}_2\text{O}_4$ nanopowders into laser plum. International Research Journal. 2018. No. 8(74). P. 32–39.
3. Osipov V. V., Platonov V. V., Lisenkov V. V., Tikhonov E. V., Podkin A. V. Study of nanoparticle production from yttrium oxide by pulse-periodic radiation of ytterbium fibre laser. Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2018. V. 124. No. 1. P. 3.
4. Осипов В. В., Соломонов В. И., Подкин А. В., Шитов В. А., Тихонов Е. В., Корсаков А. С. Синтез и исследование нанопорошков и керамики магний-алюминиевой шпинели, активированной медью. Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 1. С. 157–162.
5. Pirri A., Toci G., Patrizi B., Vannini M., Maksimov R. N., Osipov V. V., Shitov V. A., Tikhonov E. V., Yurovskikh A. S., Vecucci M. $\text{Yb}^{3+}:(\text{Lu}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{O}_3$ mixed sesquioxide ceramics for laser applications. Part I: Fabrication, microstructure and spectroscopy. Journal of Alloys and Compounds. 2021. V. 869. P. 159227.

Investigation of optical resonances arising in the scattered radiation field of a Yb fiber laser in transparent dielectric media

V. V. Osipov, E. V. Tikhonov, V. V. Platonov, V. V. Lisenkov, M. V. Kremenetsky

620016, Yekaterinburg, st. Amundsen, 106

Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

The scattering of radiation from a fiber laser in a medium made of transparent dielectric particles is studied using numerical simulation. The simulation was carried out for a number of materials with a wide range of refractive index (MgF_2 , CaF_2 , SiO_2 , BaF_2 , MgAl_2O_4 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , YSZ, TiO_2). It is found that within the width of the spectral line of radiation ($\lambda = (1.07 \pm 0.00325) \mu\text{m}$), the maximum intensity can vary in a wide range of values, which is qualitatively consistent with a large spread of experimentally measured delay times for the appearance of a laser flare. It is shown that the local maximum is the source of the initial heating of the material, which contributes to the loss of transparency by the latter and its further volumetric destruction.

Key words: laser ablation, fiber ytterbium laser, Mie scattering, finite element method, delay time of laser flare appearance.