

УДК 666.3

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КЕРАМИКИ СОСТАВА YAG:Yb, Er НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Вакалов Д.С., Чикулина И.С., Кичук С.Н.

Северо-Кавказский федеральный университет
Ставрополь, Российская федерация

Аннотация. В данной работе было исследовано влияние микроструктуры керамики состава YAG:1 ат. % Er, 5 ат. % Yb на ее теплопроводность. Показано, что для керамики состава YAG:1 ат. % Er, 5 ат. % Yb при увеличении коэффициента оптического пропускания увеличивается коэффициент теплопроводности.

Ключевые слова: оптическая керамика, YAG, теплопроводность, коэффициент светопропускания.

THE EFFECT OF THE MICROSTRUCTURE ON THERMAL CONDUCTIVITY OF YAG:Yb, Er CERAMICS

Vakalov D.S., Chikulina I.S., Kichuk S.N.

North Caucasus Federal University
Stavropol, Russian Federation

Abstract. In this work, the influence of the microstructure of YAG:1 at. % Er, 5 at. % Yb ceramics on thermal conductivity was studied. It is shown that for ceramics of the YAG:1 at. % Er, 5 at. % Yb composition, with an increase in the optical transmission coefficient, the thermal conductivity increases.

Key words: optical ceramics, YAG, thermal conductivity, light transmission coefficient.

Адрес для переписки: Чикулина И.С. пр. Кулакова, 2, г. Ставрополь, 355029, Российская Федерация
e-mail: dvakalov@ncfu.ru, ichikulina@ncfu.ru, skichuk@ncfu.ru

Введение. Легированный редкоземельными элементами иттриево-алюминиевый гранат (YAG) используется в различных оптических устройствах, включая твердотельные лазеры, а также в качестве люминофора в твердотельных осветительных приборах и сцинтилляторах благодаря своим превосходным механическим, тепловым и оптическим свойствам [1; 2].

Одним из основных препятствий при разработке лазерных систем высокой и средней мощности является проблема перегрева, которая негативно влияет на производительность лазера.

При проведении процесса интенсивной и высокоэнергетической оптической накачки в твердотельном лазерном материале наблюдается выделение большого количества тепла и, следовательно, это приводит к появлению значительного температурного градиента в материале. Все эти явления в конечном счете приводят к тепловым аберрациям и разрушению при термическом напряжении.

Таким образом, выходная мощность твердотельных лазеров в основном ограничена тепловыми эффектами в среде усиления.

Для решения проблем термического напряжения, связанных с использованием высокой выходной мощности, требуемой при высокой производительности, важно проводить комплексный термический анализ при проектировании средне и высокоэнергетических лазерных систем.

Теплопроводность K ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), тепловое расширение α ($1/\text{К}$) и термооптический коэффициент dn/dT ($1/\text{К}$) являются особенно важными параметрами для тепловой оценки лазерной среды [3].

Цель работы. Проведение данного исследования позволит установить связь между микроструктурой оптической керамики состава YAG:Yb, Er и ее теплофизическими свойствами, что может быть полезным для разработки новых материалов с улучшенными оптическими и теплофизическими характеристиками.

Методы исследования. В работе были исследованы образцы оптической керамики на основе алюмоиттриевого граната, активированные ионы иттербия и эрбия в концентрации 5 ат. % и 1 ат. % соответственно.

Для получения экспериментальных образцов использовали керамические порошки, предварительно синтезированные с использованием метода химического соосаждения. В качестве спекающих добавок использовали TEOS и MgO (таблица 1). Вакуумное спекание экспериментальных образцов A1, A2, A3, A4, A5 проводили при оптимальной температуре для каждой комбинации концентраций спекающих добавок, со скоростью нагрева $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ и временем выдержки 10 ч.

Таблица 1. Концентрации спекающей добавки

Образец	A1	A2	A3	A4	A5
MgO, масс. %	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
TEOS, масс. %	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
$T_{\text{вакуум. спек.}}$, $^\circ\text{C}$	1750	1775	1800	1825	1850

Измерение коэффициента теплопроводности проводили измерителем теплофизических характеристик LFA 467 HyperFlash (Netzsch). Коэффициент светопропускания измеряли спектрофотометром СФ-56 (ОКБ «Спектр») в диапазоне длин

волн от 200 до 1100 нм. Микрофотографии структуры оптической керамики получали, используя сканирующий электронный микроскоп *FESEM LMP Mira 3 (Tescan)*. Фазовый состав оценивали методом рентгеновской дифрактометрии с помощью дифрактометра *ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific)* с $\text{Cu-K}\alpha$ 1,5406 Å.

Экспериментальная часть. Анализ фазового состава образцов А1-А2-А3-А4-А5 показал, что в керамике присутствовала только фаза граната, без каких-либо примесных фаз. При исследовании поверхности керамических образцов (рисунок 1) было выявлено, что образцы А1 и А2 содержат закрытые поры размером 1–2 мкм. Характерной особенностью образца А3 является отсутствие примесных включений, а также открытых и закрытых пор. Образец А4 содержит поры, расположенные в межзерненном пространстве, размером от 5 до 10 мкм. В керамическом образце А5 кроме закрытых пор видно присутствие в межзерненном пространстве примесной фазы.

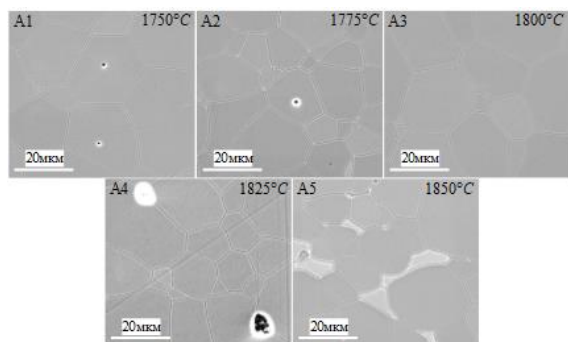


Рисунок 1 – СЭМ-изображения поверхности керамики состава $\text{YAG:1 ат.}\% \text{Er, 5 ат.}\% \text{Yb}$

Для каждого образца были получены спектры светопропускания. Коэффициент оптического пропускания на длине волны 1100 нм для образцов составил: А1 – 80,9 %, А2 – 80,1 %, А3 – 82,1 %, А4 – 79,1 % и А5 – 75,6 %. Таким образом, присутствие дефектов в микроструктуре керамических образцов, таких как открытые и закрытые поры, а также примесные включения приводит к снижению коэффициента светопропускания керамики, что, по-видимому, связано с увеличением светорассеяния. Из анализа литературных данных известно [4–6], что величина коэффициента светопропускания является основным показателем ее качества, определяющим совершенство микроструктуры, что в свою очередь оказывает значительное влияние на другие параметры, такие, например, как теплопроводность.

Для определения связи между микроструктурой оптической керамики состава YAG:Yb, Er и ее теплофизическими свойствами была получена зависимость коэффициента теплопроводности от коэффициента светопропускания, представленная на рисунке 2.

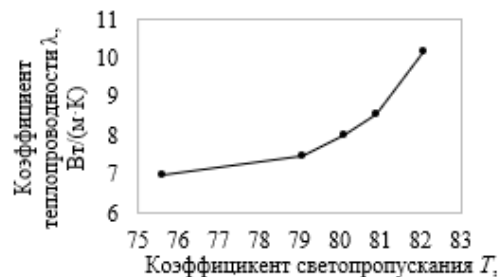


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности от светопропускания керамики состава $\text{YAG:1 ат.}\% \text{Er, 5 ат.}\% \text{Yb}$

Полученная зависимость свидетельствует о том, что образцы с наибольшим коэффициентом светопропускания обладают наилучшей теплопроводностью. Таким образом, увеличение доли различных дефектов в микроструктуре керамики приводит как к уменьшению величины светопропускания, так и к снижению теплопроводности. **Выводы.** В результате проведенной работы были получены образцы оптической керамики состава $\text{YAG:1 ат.}\% \text{Er, 5 ат.}\% \text{Yb}$. Проведены исследования оптических и теплофизических характеристик полученных образцов и изучена их микроструктура. Показано, что при уменьшении коэффициента пропускания с 82,1 до 75,6 % величина коэффициента теплопроводности снижается с 10,18 до 6,98 Вт/(м·К). Таким образом, наличие дефектов в структуре керамики оказывает негативное влияние на величину светопропускания и существенно снижает ее теплопроводность.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00084 (<https://rscf.ru/project/23-23-00084/>), используя научное оборудование центра коллективного пользования СКФУ.

Литература

1. Ikesue, A. Ceramic laser materials / A. Ikesue, Y.L. Aung // *Nat. Photonics*. – 2008. – Vol. 2, № 12. – P. 721–727.
2. Taira, T. RE3+-ion-doped YAG Ceramic Lasers / T. Taira // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2007. – Vol. 13, № 3. – P. 798–809.
3. *Solid-State Laser Engineering*. NY: Springer New York, 2006. – Vol. 1.
4. Bakunov, V.S. Special characteristics of the technology of high-density technical ceramics. Chemical methods for obtaining the initial powders / V.S. Bakunov, E.S. Lukin // *Glas. Ceram.* – 2008. – Vol. 65, № 1–2. – P. 33–37.
5. Лукин, Е.С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Часть I. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики / Е.С. Лукин // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 1996. – № 1. – P. 5–14.
6. Effect of Microstructure on Transmission Properties of Polycrystalline Transparent Ceramics / Li Q. [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2011. – Vol. 704–705. – P. 842–846.