

УДК 535.3

**АНАЛИЗ И ОТОБРАЖЕНИЕ
ВНУТРЕННИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ПРОЗРАЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ПУТЁМ ТРЁХМЕРНОГО ЛАЗЕРНОГО
ГЕТЕРОДИННОГО МИКРОЗОНДИРОВАНИЯ***

И. Ш. Штейнберг¹, П. Е. Твердохлеб^{1,2,3}, А. Ю. Беликов¹

¹*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

³*Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

E-mail: steinberg@iae.nsk.su

tverdokhleba@iae.nsk.su

Предложен метод изучения внутренних фазовых неоднородностей прозрачных оптических материалов путём их «поточечного» трёхмерного лазерного гетеродинного микрозондирования. Световым микрозондом в этом случае является бегущая микрорешётка, формируемая в зоне пересечения двух сфокусированных когерентных пучков света: опорного и сигнального. Дана оценка размеров микрозонда по координатам x, y, z и степени влияния сферической аберрации при глубинном микрозондировании. Возможности метода иллюстрируются на примерах восстановления и последующего отображения фазовых неоднородностей в объёме лазерной керамики и её произвольных слоях.

Ключевые слова: лазерное гетеродинное микрозондирование, оптические материалы, фазовые микронеоднородности.

DOI: 10.15372/AUT20180603

Введение. В настоящее время осуществляются масштабные исследования по разработке новых оптических материалов, необходимых для создания перспективных источников лазерного излучения, носителей информации сверхбольшой ёмкости, фотонных кристаллов, элементов дифракционной оптики, брэгговских решёток и других элементов (устройств) оптики и фотоники. При этом геометрическая толщина таких материалов (от сотен микрон до нескольких миллиметров) и степень их внутреннего оптического качества являются важнейшими современными ресурсами для радикального улучшения генерационных характеристик, информационной ёмкости, угловой селективности, спектральной разрешающей способности, скрытости хранения данных и других характеристик создаваемых средств.

Наиболее часто послойное изучение внутренних амплитудно-фазовых неоднородностей оптических материалов проводится с помощью лазерных сканирующих конфокальных микроскопов [1–3]. Такие микроскопы в отличие от традиционных позволяют достичь высокой пространственной селективности по глубине и получить контрастные изображения микронеоднородностей. Это реализуется за счёт использования точечной диафрагмы, размещённой в плоскости изображения и ограничивающей поток фонового излучения,

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117053110007-0).

рассеянного за пределами фокальной плоскости объектива. В данном случае излучение, рассеянное зондируемым микрообъемом среды, проходит через диафрагму и затем регистрируется, а излучение от микрообъемов, расположенных выше и ниже зондируемого, блокируется и существенно ослабляется. Такие преимущества проявляются главным образом при исследовании флуоресцирующих сред [4].

Известно также, что полоса пространственных частот микронных и субмикронных фазовых неоднородностей плохо согласуется с полосой пространственных частот оптической передаточной функции отражательного конфокального микроскопа. Это, как отмечено в [5], приводит к снижению чувствительности прибора при исследовании прозрачных (чисто фазовых) сред.

В данной работе предложен более перспективный метод обнаружения и визуализации фазовых микронеоднородностей. Как показано на рис. 1, в отличие от оптической микроскопии здесь используются два когерентных сфокусированных световых пучка: опорный 1 и сигнальный 2. Частота сигнального пучка сдвинута относительно частоты опорного пучка на величину ΔF . В силу этого в области пересечения пучков формируется бегущая интерференционная микрорешётка 7, с помощью которой осуществляется сканирование микронеоднородности 4 в объёме 3. Часть излучения сигнального пучка, рассеянного на микронеоднородности 5, будет распространяться в направлении фотодетектора 6. В этом же направлении распространяется часть пучка 1, прошедшего без рассеяния. Взаимодействие этих двух пучков света с разными частотами приводит к возникновению фототока с разностной частотой ΔF на выходе фотодетектора. Метод обладает высокой пространственной селективностью, поскольку детектирование происходит только в области пересечения пучков 1 и 2. За счёт трёхмерного перемещения среды относительно светового микрозонда (или микрозонда относительно среды) можно восстановить картину распределения неоднородностей во всём объёме материала. Основными преимуществами гетеродинного микрозонда являются высокая чувствительность при обнаружении фазовых (микронных и субмикронных) неоднородностей, эффективное подавление внешнего фонового излучения и, что особенно важно, возможность избирательного послойного анализа микронеоднородностей среды. В этом случае обеспечивается также высокая помехозащищённость полезного сигнала от шумов рассеяния оптических компонент и исследуемой среды.

Отметим, что идея послойного гетеродинного зондирования была, по-видимому, впервые изложена в работе [6]. Однако конкретная реализация данной идеи основывалась на

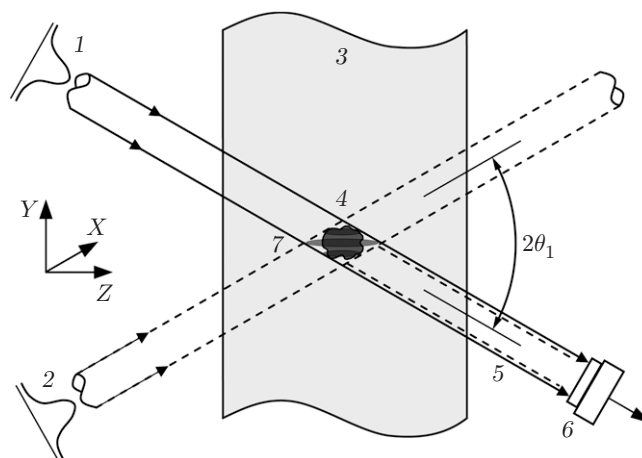


Рис. 1. Схема принципа гетеродинного микрозондирования фазовых неоднородностей в объёме изучаемой среды

формировании опорного и сигнального пучков в двух независимых каналах, что привело к необходимости точного совмещения волновых фронтов этих пучков в плоскости фотоприёмника в процессе всего 3D-микроразондирования. Возможно, из-за сложности такого прецизионного совмещения идея не получила практической реализации.

Первые положительные результаты применения лазерного гетеродинного микроразонда получены при исследовании образцов прозрачной керамики Nd:YAG и Ho:YAG [7, 8]. В дальнейшем была проведена оценка размеров микроразонда, а также изучен характер сферических aberrаций, возникающих при глубинном микроразондировании оптических материалов. Кроме того, развиты методы обработки результатов трёхмерного гетеродинного микроразондирования и последующего формирования картины распределения неоднородностей в объёме и в произвольных слоях изучаемых материалов. Это позволило провести изучение внутренних рассеивающих свойств новых образцов лазерной керамики.

1. Реализация двухпучкового лазерного гетеродинного микроразондирования.

Оптико-электронная схема созданной экспериментальной установки приведена на рис. 2. В качестве источника излучения использован полупроводниковый лазер 1 мощностью 20 мВт с длиной волны 660 нм. Перетяжка пучка лазера с помощью асферической линзы 2 переносится в зону акустооптического взаимодействия модулятора 3. Полученные в результате дифракции на бегущей акустической волне световые пучки с помощью телескопической системы, состоящей из линзы 4 и объектива 5, совмещаются в адресуемом слое исследуемого материала 6, где и формируется бегущая микрорешётка зонда. Сдвиг частоты дифрагированного пучка на величину $\Delta F = 88$ МГц относительно частоты опорного пучка осуществляется с помощью акустооптического модулятора (АОМ). В качестве фокусирующего объектива использован микрообъектив $40\times$ с фокусным расстоянием 4,5 мм, рабочим отрезком 2 мм и числовой апертурой $NA = 0,6$. При указанных параметрах в фокальной плоскости микрообъектива формируется микрорешётка размерами $\Delta x \times \Delta y = 0,8 \times 1,2$ мкм.

При анализе фазовых неоднородностей материала проводят его пошаговое прецизионное перемещение вдоль осей X , Y и Z относительно области пересечения сфокусированных

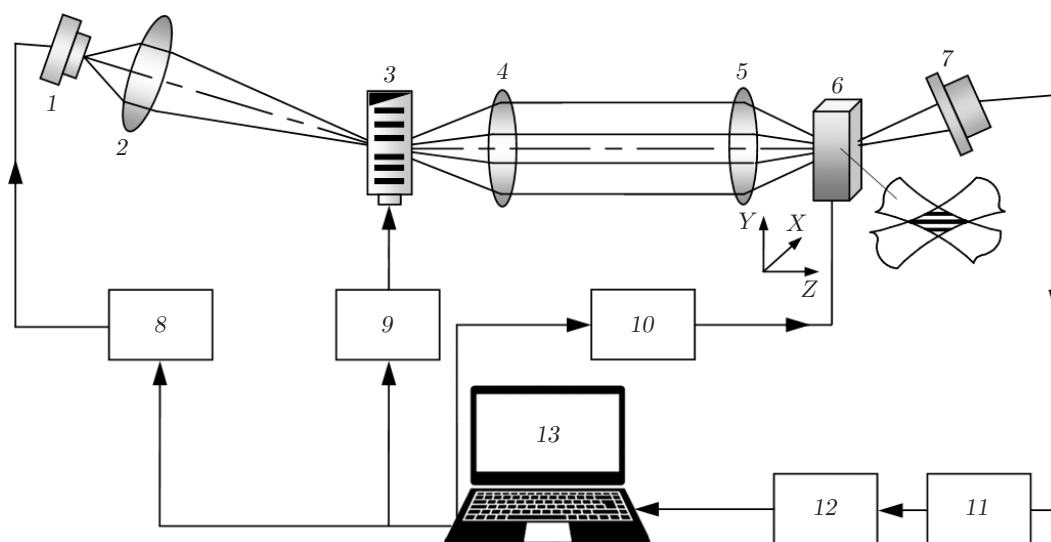


Рис. 2. Оптико-электронная схема автоматизированного лазерного гетеродинного микроразонда: 1 — полупроводниковый лазер; 2 — асферическая линза; 3 — АОМ; 4 и 5 — линза и объектив телескопической системы; 6 — исследуемая оптическая среда (расположена на пьезопозиционере); 7 — фотоприёмник; 8 и 9 — блоки питания лазера и АОМ; 10 — блок управления пьезопозиционером; 11 — усилитель фототока; 12 — блок выделения амплитудной составляющей сигнала; 13 — персональный компьютер

пучков. Диапазон перемещения используемого пьезопозиционера Tritor 400 (Piezosystem Jena, Германия) по всем координатам составляет 310 мкм, а его линейная разрешающая способность в режиме обратной связи — не менее 35 нм. В связи с этим область сканирования в плоскости образца составляла $\Delta X \times \Delta Y = 310 \times 310$ мкм, а по толщине — $\Delta Z = 310n$ мкм и с учётом значения показателя преломления лазерной керамики $n = 1,8\text{--}2$ находилась в пределах $\Delta Z = 558\text{--}620$ мкм.

Оценить относительную долю мощности излучения сигнальной волны, рассеянной на микронеоднородностях в исследуемой области пространственных частот, можно следующим образом. Как было сказано выше, на фотоприёмник попадают два световых пучка: опорный 1 и сигнальный 5, рассеянный на микронеоднородностях. На выходе фотодетектора, включающего фотоприёмник 7, усилитель фототока 11 и блок выделения амплитудной составляющей выходного сигнала 12, возникает переменный ток с частотой, равной разности частот световых пучков, и амплитудой

$$i_s = 2(I_r I_h)^{1/2}, \quad (1)$$

где I_r и I_h — постоянные компоненты фототока, измеренные независимо для опорного и сигнального пучков. Если выбрать АОМ с дифракционной эффективностью 50 % (случай максимального контраста микрорешётки) и обозначить величину фототока, измеренную при выключенном АОМ, символом I_{f_0} , то получим $I_r = I_{f_0}/2$ и $I_h = \eta I_{f_0}/2$, где η — относительная доля мощности излучения сигнальной волны, рассеянной на микронеоднородности. Подставляя выражения для I_r и I_h в (1), получим

$$\eta^{1/2} = i_s / I_{f_0}. \quad (2)$$

Реально измеряемыми величинами являются не токи, а напряжения, поэтому, принимая во внимание переходные сопротивления усилителя 11 для переменной и постоянной составляющих фототока, преобразуем выражение (2):

$$\eta^{1/2} = u_s / 40,6 U_{f_0}, \quad (3)$$

где u_s и U_{f_0} — напряжения, пропорциональные i_s и I_{f_0} соответственно.

Оценку изменения показателя преломления на границе микронеоднородности можно провести при условии соизмеримости размеров неоднородности и микрозонда. Полагая, что микронеоднородность имеет преимущественно фазовый характер, амплитуду модуляции показателя преломления Δn найдём по известной формуле Когельника для фазовых пропускающих голограмм [9]:

$$\eta^{1/2} = \sin(\pi \Delta n \Delta z / \lambda \cos \theta_1), \quad (4)$$

где θ_1 — половинный угол между световыми пучками внутри материала, а Δz — размер микрозонда по глубине. При $\eta \ll 1$, из выражений (3) и (4) следует, что величина u_s , измеряемая гетеродинным фотодетектором, пропорциональна произведению $\Delta n \times \Delta z$. Это условие выполняется достаточно хорошо тогда, когда спектры пространственных частот светового микрозонда и микронеоднородностей близки друг к другу. Экспериментально подтверждено, что в этом случае минимальное относительное значение мощности гетеродинной волны, которое можно измерить с помощью гетеродинного фотодетектора, находится на уровне $\eta = 1,6 \cdot 10^{-7}$. Такому значению η , как следует из формулы (4), соответствует изменение показателя преломления среды на величину $\Delta n \sim 1,5 \cdot 10^{-5}$, что определяет порог чувствительности предлагаемого двухпучкового лазерного микрозонда. Степень допустимого нарушения условия соответствия упомянутых спектров требует дополнительного исследования. Пока установлено, что при детектировании субмикронных фазовых неоднородностей справедливость формулы (4) нарушается.

2. Размер и форма лазерного гетеродинного микрорезонатора. Размер лазерного гетеродинного микрорезонатора, показанного на рис. 2, определяется размерами объёмной микрорешётки, сформированной в исследуемом материале в результате пересечения двух сфокусированных гауссовых пучков света.

Из [10, 11] следует, что распределение интенсивности интерференционного поля гауссовых пучков, пересекающихся в среде с показателем преломления n , содержит составляющую, изменяющуюся с высокой пространственной частотой:

$$g(x, y, z) \propto \exp \left[\frac{-2(x^2 + y^2 \cos^2 \theta_1 + z^2 \sin^2 \theta_1)}{w_0^2} \right] \cdot \cos(-2k \sin \theta_1 y). \quad (5)$$

Здесь w_0 — радиус перетяжки пучка; θ_1 — половинный угол между осями пучков в среде; $k = 2\pi/\lambda_1$ (λ_1 — длина волны излучения в среде). Период сформированной микрорешётки $d = \lambda_1/2 \sin \theta_1$, а поверхность объёма, внутри которого амплитуда высокочастотной составляющей имеет величину не менее $1/2$ максимальной интенсивности, описывается уравнением эллипсоида $(x^2/r_x^2) + (y^2/r_y^2) + (z^2/r_z^2) = 1$, где

$$r_x = w_0(\ln 2/2)^{1/2}; \quad r_y = w_0(\ln 2/2)^{1/2}/\cos \theta_1; \quad r_z = w_0(\ln 2/2)^{1/2}/\sin \theta_1 \quad (6)$$

являются размерами его полуосей.

Условия оптимального заполнения апертуры фокусирующего микрообъектива 5 и соответственно получения минимального размера микрорешётки даются соотношениями

$$\sin \theta = n \sin \theta_1 = NA/2, \quad (7)$$

$$w_0 = (2/\pi)(\lambda_0/NA), \quad (8)$$

где λ_0 — длина волны излучения в воздухе, а θ — половинный угол схождения пучков в воздухе. Подставляя (7) и (8) в выражение (6), получим формулы для определения минимальных размеров светового микрорезонатора в среде (по уровню $1/2$ максимальной интенсивности):

$$r_{x_{\min}} = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \frac{\lambda_0}{NA}, \quad (9)$$

$$r_{y_{\min}} = \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \frac{\lambda_0}{NA \sqrt{1 - (NA/2n)^2}} \approx \frac{\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \frac{\lambda_0}{NA}, \quad (10)$$

$$r_{z_{\min}} = \frac{2\sqrt{2 \ln 2}}{\pi} \frac{\lambda_0 n}{(NA)^2}. \quad (11)$$

Для $\lambda_0 = 0,66$ мкм, $NA = 0,6$ и среды с показателем преломления $n = 1,5$ из выражений (9)–(11) следует, что $2r_{x_{\min}} = 2r_{y_{\min}} = 0,78$ мкм, а $2r_{z_{\min}} = 4$ мкм. Наименьшие размеры, полученные нами экспериментально, составляли $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0,8 \times 1,2 \times 5,2$ мкм и были близкими к дифракционному пределу.

Из выражений (9)–(11) также следует, что размер микрорезонатора можно уменьшить за счёт увеличения числовой апертуры фокусирующего объектива и уменьшения длины волны излучения. Так, при использовании полупроводникового лазера с длиной волны $0,53$ мкм и микрообъектива с числовой апертурой $NA = 0,7$ размеры микрорезонатора в среде будут составлять $2r_{x_{\min}} = 2r_{y_{\min}} = 0,57$ мкм и $2r_{z_{\min}} = 2,4$ мкм.

Пространственная частота микрорешётки, формируемой в исследуемом материале, определяется выражением $\nu_0 = 2 \sin \theta / \lambda_0$. Так, для $\theta = 20^\circ$, $\lambda_0 = 0,66$ мкм получим

$\nu_0 = 1036$ лин/мм. Спектральный фурье-анализ показал, что полоса пространственных частот микрозонда как усечённого фрагмента микрорешётки находится в пределах 706–1346 лин/мм (по уровню 1/2).

Следует отметить, что выражения для минимальных размеров светового микрозонда (9)–(11) являются дифракционно-ограниченными и не учитывают влияния сферической аберрации, возникающей при перемещении лазерного микрозонда по толщине материала. Экспериментально (с помощью микроскопа и ПЗС-камеры) установлено, что поперечные размеры изображения микрозонда $\Delta x \times \Delta y = 0,8 \times 1,2$ мкм, сформированного в фокальной плоскости микрообъектива, на глубине среды в 500 мкм увеличиваются примерно в 1,5 раза.

Продольный размер микрорешётки (по уровню 1/2 максимальной интенсивности) для дифракционно-ограниченных пучков согласно соотношению (6) равен $\Delta z = 2r_{y0} n / \sin \theta$, где $2r_{y0}$ — размер перетяжки сфокусированного гауссового пучка вдоль оси Y (по уровню 1/2), а θ — половинный угол между световыми пучками вне среды. Так, для $r_{y0} = 0,6$ мкм, $\theta = 20^\circ$ и $n = 1,8$ получим $\Delta z = 6,5$ мкм ($\Delta z = 3,6$ мкм для $n = 1$).

Экспериментальное исследование зависимости продольного размера микрорешётки от глубины среды, на которой она сформирована, проведено по следующей методике. Был изготовлен материал, содержащий латексные микросферы диаметром 0,95 мкм, размещённые в плёнке поливинилового спирта. Толщина плёнки составляла 20 мкм. Лазерное гетеродинное микрозондирование единичных микросфер осуществлялось путём их сканирования бегущей микрорешёткой вдоль оси Z . Для изменения глубины расположения микросфер перед плёнкой устанавливались стеклянные пластины толщиной от 150 до 620 мкм. Показано, что при микрозондировании среды в диапазоне глубин от 10 до 500 мкм продольный размер микрозонда увеличивается в 2,13 раза, при этом характер изменения линейный [12].

Зависимость изменения поперечных и продольного размеров двухпучкового лазерного микрозонда от глубины его проникновения в среду является существенной, и, если не принимать специальных мер компенсации, её следует учитывать при интерпретации результатов микрозондирования.

3. Результаты экспериментов. Опыты по обнаружению и изучению внутренних фазовых неоднородностей в точечных профилях, сечениях и макрообъёмах прозрачной керамики проводились в предлагаемой работе с помощью автоматизированной установки, схема которой показана на рис. 2. Программы для анализа, обработки и визуализации (2D и 3D) экспериментальных данных были созданы специально для этой серии экспериментов. Исследуемые образцы прозрачной лазерной керамики имели вид дисков диаметром 10–12 мм и толщиной 1–2 мм. Поверхность дисков совпадала с плоскостью XOY , а их толщина — с осью Z . Размеры лазерного микрозонда в керамике с показателем преломления $n = 1,8$ составляли $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0,8 \times 1,2 \times 6,5$ мкм. Сведения о внутренних рассеивающих свойствах керамики получались путём непрерывного лазерного микрозондирования образцов по глубине в выбранных точках ($i = 0, 1, \dots, m$) поверхности, в результате чего формировался массив экспериментальных данных в виде функций (профилей) $A_{ij}(z_j)$, где A_{ij} — амплитуда выходного сигнала гетеродинного фотодетектора, соответствующая уровню рассеяния излучения на глубине z_j , $j = 1, 2, \dots, N$, а N — число отсчётов такого сигнала в области микрозондирования. Согласно разд. 2 амплитуда рассеянного излучения на различных глубинах образца измерялась в диапазоне пространственных частот 706–1346 лин/мм.

Пример типового сигнала, получаемого в результате непрерывного микрозондирования образца по глубине (толщине), приведён на рис. 3. Здесь по оси абсцисс указаны области перемещения лазерного микрозонда в воздухе и керамике. Среднеквадратичное изменение амплитуды выходного сигнала фотодетектора в воздухе составляет $u_s = 5,7$ мВ

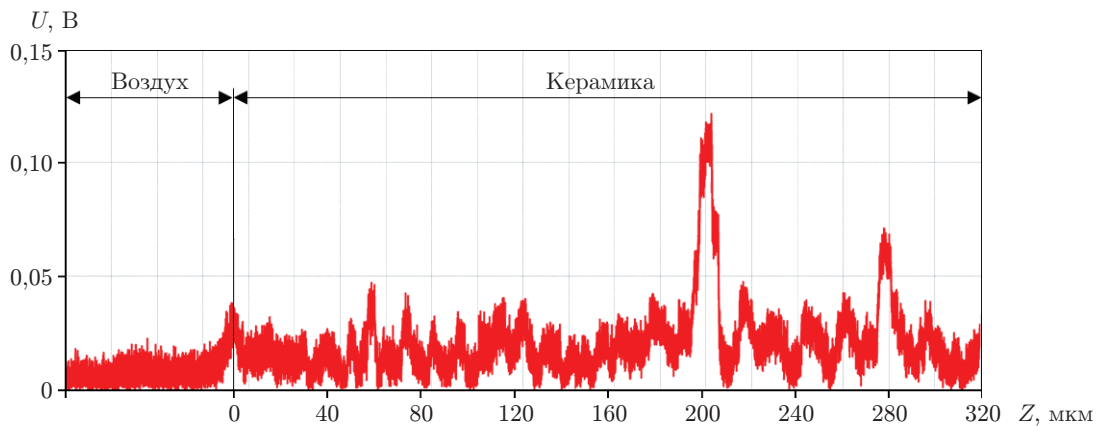


Рис. 3. Профиль изменения амплитуды сигнала на выходе гетеродинного фотодетектора при глубинном микронзондировании образца керамики по оси Z

и определяется шумами рассеяния оптических элементов микронзонда, шумами усилителя фототока и внешними наводками электронных схем. Уровень сигнала заметно возрастает при переходе микронзондом границы раздела «воздух — керамика». В области 40 – 180 мкм наблюдаются несколько пиков с амплитудами 30–40 мВ, размер которых 7–8 мкм (по полувысоте) примерно равен продольному размеру микронзонда на этой глубине. Поскольку форма выходного сигнала является результатом свёртки бегущей микрорешётки и анализируемой микронеоднородности, то можно предположить, что в данном случае размеры наблюдаемых неоднородностей находятся на субмикронном уровне. Пик с максимальной амплитудой на глубине около 200 мкм имеет ширину 13 мкм. Принимая во внимание, что из-за влияния сферической aberrации продольный размер микронзонда на такой глубине увеличивается до 9 мкм, можно также предположить, что размер обнаруженной неоднородности находится на уровне $\sim(4-5)$ мкм. Неоднородность меньшей амплитуды, но примерно той же ширины наблюдается на глубине 280 мкм. В целом из графика следует, что по мере перемещения микронзонда по глубине образца от 0 до 320 мкм происходит постепенное уширение пиков, что, скорее всего, объясняется влиянием сферической aberrации.

Обнаружение и визуализация фазовых неоднородностей в отдельных сечениях керамики ($Y0Z$ или $X0Z$) проводились путём:

- а) последовательного глубинного микронзондирования образцов в точках y_i (или x_i), $i = 0, 1, \dots, m$, расположенных вдоль оси Y (или оси X) с шагом d_y (или d_x);
- б) регистрации m выходных амплитудных профилей изменения сигналов гетеродинного детектора $A_{ij}(z_j)$, $j = 1, 2, \dots, N$;
- в) последующего синтеза $2D$ -изображений из полученного массива данных.

Примеры таких изображений показаны на рис. 4. В этом эксперименте количество точек вдоль оси Y , в которых проводилось глубинное микронзондирование, равнялось 31 ($m = 30$), шаг размещения $d_y = 2$ мкм. Размеры сечения $Y \times Z = 60 \times 320$ мкм. На рис. 4, а значения амплитуд выходных сигналов кодируются интенсивностью чёрного цвета (шкала градаций серого). На рис. 4, б в уменьшенном масштабе показаны профили таких сигналов. Приведённые изображения дают достаточно наглядное представление о местоположении, размере, форме и величине (амплитуде) фазовых неоднородностей в исследуемом сечении. Например, можно видеть значительные по амплитуде и размеру неоднородности в левом верхнем углу изображения, т. е. на границе раздела «воздух — керамика». Наблюдаются протяжённые наклонные неоднородности (z -образные) в правой части изображения. Поскольку профиль выходного сигнала, ранее показанный на рис. 3, является составной частью изображений рис. 4, а, б (выделен стрелками), то возникает возможность более детального анализа неоднородностей с пиками на глубине 200 и 280 мкм. Теперь с большой

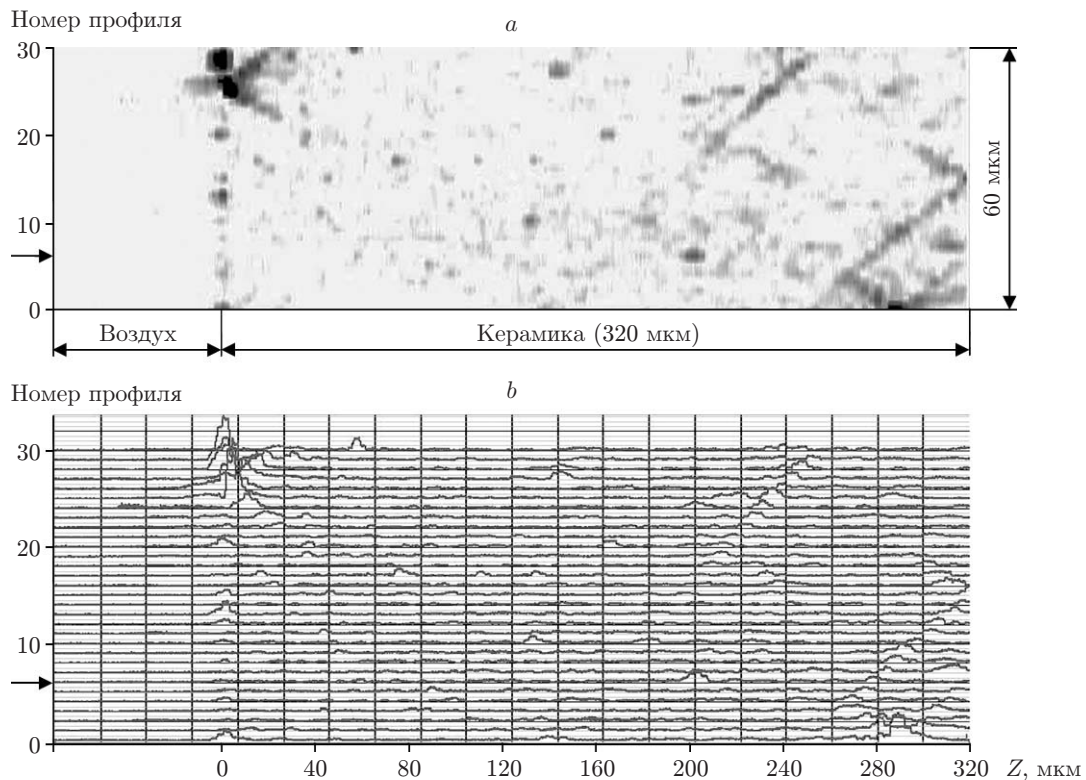


Рис. 4. Графическое представление результатов микрозондирования в отдельном сечении образца лазерной керамики: *a* — топограмма сигналов микрозонда в области $Y \times Z = 60 \times 320$ мкм (масштаб по осям Y и Z разный); *b* — амплитуды сигналов 31 профиля микрозондирования. Стрелками выделен профиль, приведённый на рис. 3

долей вероятности можно утверждать, что неоднородность на глубине 200 мкм является локальной, в то время как неоднородность на 280 мкм — часть протяжённой (z -образной) неоднородности.

Более полное представление о фазовых неоднородностях получено при исследовании макрообъёмов двух образцов прозрачной керамики. Образец керамики 1 (Nd 1 % Y_2O_3) фирмы Baikowski (Япония) имел диаметр 10 мм и толщину 2,2 мм, а образец 2 отечественного производителя — диаметр 10 мм и толщину 1 мм. В обоих случаях микрозондирование проводилось на глубинах от 0 до 240 мкм вблизи центров дисков: по оси Y — в 41 точке с шагом $d_y = 1$ мкм, а по оси X — в 21 сечении с шагом $d_x = 2$ мкм. Таким образом, размеры изучаемого макрообъёма составляли $40 \times 40 \times 240$ мкм. Общее число профилей $41 \times 21 = 861$, а количество отсчётов в каждом из них 20000.

Для обработки полученного массива экспериментальных данных создано программное обеспечение, позволяющее получать 2D- и 3D-изображения неоднородностей соответственно в слоях и макрообъёмах образцов. Программа даёт возможность визуализировать распределение неоднородностей в любых сечениях (слоях), перпендикулярных осям X , Y и Z , и рассматривать результаты 3D-моделирования с различных ракурсов. Также реализована возможность получения изображений наиболее существенных (например, по амплитуде) неоднородностей путём «фильтрации» шумовых и менее значимых, что позволяет без помех изучать их размеры, форму и положение в пространстве.

Для оценки качества образцов керамики введена количественная характеристика, которая была названа степенью неоднородности. Она равна отношению совокупной площади неоднородностей в анализируемом слое (в процентах) с амплитудой выше некоторой заданной величины (уровень отсечки) к общей площади слоя. Минимальный уровень отсечки

Таблица 1

Номер слоя	Уровень отсечки, В					
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
	Степень неоднородности, %					
1	0,14	0,01	0	0	0	0
2	0,12	0,01	0	0	0	0
4	0,01	0	0	0	0	0
14	0,26	0,07	0,03	0,02	0	0
15	0,63	0,17	0,13	0,10	0,09	0,03
Среднее значение степени неоднородности	0,24	0,05	0,03	0,02	0,01	0,003

0,02 В превышает уровень шумов микрозвонда в воздухе не менее чем в 5 раз. В работе [7] показано, что керамика с меньшим числом неоднородностей (качественная оценка) имеет меньший порог генерации, поэтому мы полагаем, что введённая нами количественная характеристика может также коррелировать с порогом генерации.

В табл. 1 приведено распределение степеней неоднородности по пяти слоям образца 1, а также их средние (по всем слоям) значения для шести уровней отсечки. Так, для уровня отсечки 0,02 В степень неоднородности для слоя 1 составляет величину 0,14 %. Максимальное значение 0,63 % для этого уровня отсечки достигается в 15-м слое, а среднее значение по слоям составляет 0,24 %. Для уровня отсечки 0,07 В видно, что неоднородности такой амплитуды присутствуют лишь в 15-м слое. В дополнение к данным таблицы на рис. 5 приведены топограммы лучшего (4-го с минимальной степенью неоднородности) и худшего (15-го с максимальной степенью неоднородности) слоёв, а также 3D-изображение области сканирования с уровнем отсечки 0,02 В. Это означает, что на рисунке отображены все неоднородности с амплитудой больше 0,02 В.

Сравнение качества образцов керамики проводилось путём сопоставления средних значений степеней их неоднородности при нескольких значениях уровней отсечки с соответствующими данными, приведёнными в табл. 1.

В табл. 2 приведено распределение степени неоднородности по пяти слоям образца 2 и указаны их средние (по всем слоям) значения для восьми уровней отсечки.

Сопоставление средних значений, представленных в табл. 2, с данными табл. 1 показывает, что для уровня отсечки 0,02 В степень неоднородности больше в 8,9 раза, для

Таблица 2

Номер слоя	Уровень отсечки, В							
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,15	0,2	0,25
	Степень неоднородности, %							
1	4,85	2,28	1,69	1,27	1,03	0,74	0,45	0,33
2	3,49	1,43	0,94	0,68	0,52	0,35	0,28	0,22
3	4,81	0,93	0,55	0,42	0,32	0,24	0,05	0
4	8,98	0,67	0,10	0,05	0,02	0	0	0
5	0,54	0,17	0,06	0,02	0	0	0	0
Среднее значение степени неоднородности	2,13	0,66	0,37	0,26	0,20	0,11	0,05	0,03

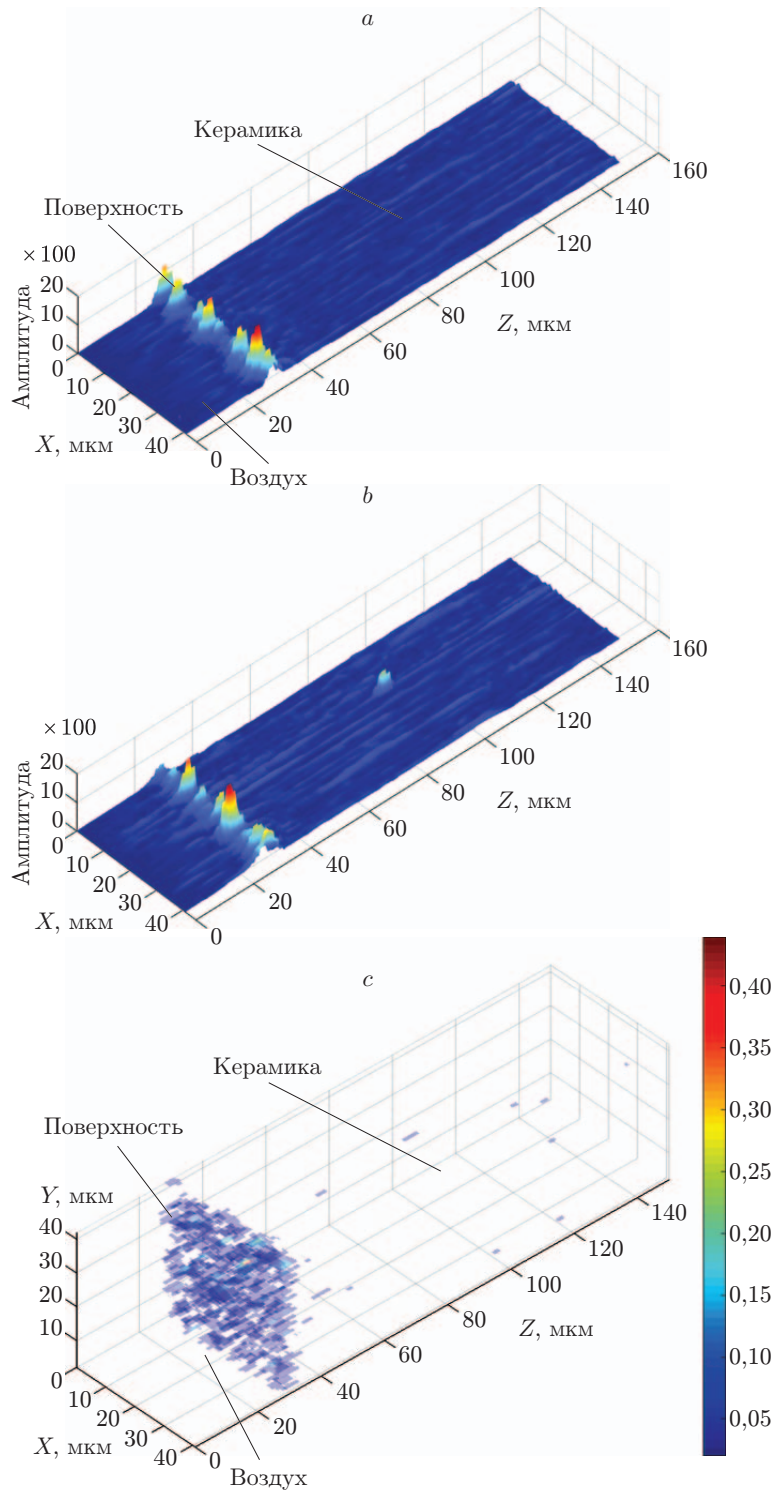


Рис. 5. Распределение фазовых неоднородностей в образце 1: *a* — топограмма лучшего (4-го) слоя; *b* — топограмма худшего (15-го) слоя; *c* — 3D-изображение области сканирования с уровнем отсечения 0,02 В

уровня отсечки 0,06 В — в 37 раз. Максимальные значения откликов в образце 1 не превышают 0,07 В, в то время как в анализируемом образце 2 встречаются неоднородности, дающие отклик до 1 В.

На рис. 6 приведены топограммы лучшего и худшего слоёв образца 2, а также 3D-изображение области сканирования с уровнем отсечения 0,02 В. Видно, что неоднородности распределены в объёме образца случайным образом.

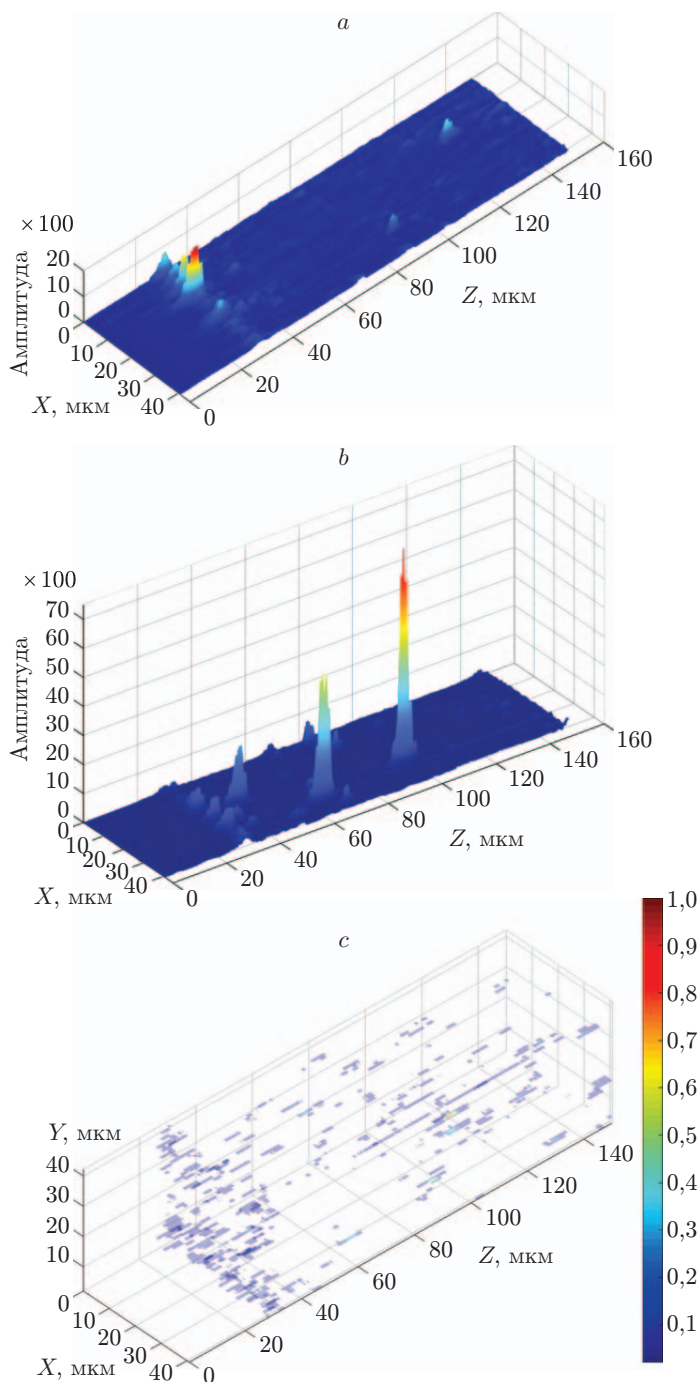


Рис. 6. Распределение фазовых неоднородностей в образце 2: *a* — топограмма лучшего (5-го) слоя; *b* — топограмма худшего (2-го) слоя; *c* — 3D-изображение области сканирования с уровнем отсечения 0,02 В

Заключение. Предложены высокоразрешающий метод лазерного микрозондирования, позволяющий исследовать распределения фазовых неоднородностей внутри прозрачных оптических материалов, а также аппаратно-программные средства, необходимые для его реализации. Размеры объёмного микрозонда в среде с показателем преломления $n = 1,5$ при использовании излучения с $\lambda = 0,66$ мкм и фокусирующего объектива с $NA = 0,6$ составляют $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0,8 \times 1,2 \times 5,2$ мкм (по уровню 1/2 максимальной интенсивности). Показано, что в диапазоне микрозондирования по глубине от 10 до 500 мкм вследствие наличия сферической аберрации поперечные размеры (по осям X, Y) микрозонда увеличиваются в 1,5 раза, а продольный (по оси Z) — в 2,13 раза. Такие изменения существенны и должны учитываться при обработке результатов микрозондирования.

Экспериментально подтверждены возможности обнаружения, наблюдения и оценки размеров, местоположения, формы и ориентации фазовых микронеоднородностей в заданных направлениях, сечениях и макрообъёмах образцов лазерной керамики. Проведено сравнение качества таких образцов по степени наличия фазовых микронеоднородностей.

Методы лазерного микрозондирования образцов прозрачной керамики и методы обработки экспериментальных данных могут быть использованы на стадиях освоения технологии производства подобных материалов, а также в процессе их практического применения.

Ожидается, что дальнейшее развитие метода лазерного гетеродинного микрозондирования будет идти по пути накопления опыта интерпретации наблюдаемых экспериментальных данных для более широкого класса фазовых оптических материалов (совместно с материаловедами), освоения технологий двумерного и трёхмерного лазерного гетеродинного микрозондирования амплитудно-фазовых оптических материалов, а также снижения (или исключения) влияния сферической аберрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кларк Э. Р., Эберхардт К. Н. Микроскопические методы исследования материалов. М.: Техносфера, 2007. 375 с.
2. Kino G. S., Corle T. R. Confocal scanning optical microscopy // Phys. Today. 1989. **42**, N 9. P. 55–62.
3. Pawley J. B. Fundamental and practical limits in confocal light microscopy // Scanning. 1991. **13**, Is. 2. P. 184–198.
4. Пат. 2145109 РФ. Способ оптической томографии и микроскоп для его осуществления / Г. Г. Левин, Г. Н. Вишняков. Опубл. 27.01.2000, Бюл. № 3.
5. Ishikawa M., Kawata Y., Egami C. et al. Reflection-type confocal readout for multilayered optical memory // Opt. Lett. 1998. **23**, N 22. P. 1781–1783.
6. Sawatari T. Optical heterodyne scanning microscope // Appl. Opt. 1973. **12**, Is. 11. P. 2768–2772.
7. Твердохлеб П. Е., Щепеткин Ю. А., Штейнберг И. Ш. и др. Измерение энергетических спектров малоуглового рассеяния и распределения оптических микронеоднородностей лазерной керамики // Квантовая электроника. 2014. **44**, № 6. С. 588–593.
8. Bagayev S. N., Osipov V. V., Vatnik S. M. et al. Ho:YAG transparent ceramics based on nanopowders produced by laser ablation method: Fabrication, optical properties, and laser performance // Opt. Mat. 2015. **50**, Pt. A. P. 47–51.
9. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell. Syst. Tech. Journ. 1969. **48**, N 9. P. 2909–2947.

10. **Трехмерная** лазерная модификация объемных светочувствительных материалов / Под ред. П. Е. Твердохлеба. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 353 с.
11. **Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
12. **Steinberg I. Sh., Shepetkin Yu. A.** Restoration of the near-diffraction-limited response size at heterodyne detection of microholograms, distorted by spherical aberration // Appl. Opt. 2015. **54**, N 30. P. 8878–8883.

Поступила в редакцию 21 августа 2018 г.
