

07;12

Фотохромная когерентная спекл-диагностика объемных рассеивающих сред и оптических световодов лазерами с перестраиваемой частотой

© Г.Г. Акчурин, А.Г. Акчурин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: rector@sgu.ssu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2004 г.

Впервые обнаружена динамика спекл-поля при зондировании стационарных объемных рассеивающих частично-упорядоченных сред или маломодовых оптических световодов при зондировании излучением лазерного диода ($\lambda = 654 \text{ nm}$) и компактного YAG:Nd-лазера ($\lambda = 532 \mu\text{m}$) с диодной накачкой при перестройке частоты. Динамический когерентный спекл-фотохромный эффект экспериментально наблюдается, если девиация частоты зондирующего излучения соизмерима или больше величины эффективной разности фазовых задержек волноводных мод в оптическом волокне или волн в случайной рассеивающей среде. Предложенная фотохромная спекл-технология позволяет определять межмодовую дисперсию световодов длиной порядка метра, а также величину фазовых задержек в тестовых фторопластовых структурах в режиме как малократного рассеяния при толщинах $10\text{--}20 \mu\text{m}$, так и многократного при толщинах до двух сантиметров.

В настоящее время в ведущих оптических центрах интенсивно разрабатываются бесконтактные оптические методы диагностики неоднородных случайных или структурированных объемных сред, включая биоткани, в связи с созданием оптических когерентных оптических томографов [1,2]. Наибольший прогресс в экспериментальной реализации оптических томографов был достигнут при использовании низкокогерентных оптических томографов, основу которых составляет одномодовый волоконно-оптический интерферометр Майкельсона, сопряженный с суперлюминесцентным полупроводниковым диодом, об-

ладающий разрешением $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ и предельной глубиной зондирования $1\text{--}1.5\ \text{mm}$.

Для диагностики оптически неоднородных рассеивающих биотканей глубиной несколько сантиметров было предложено использовать нестационарные оптические методы, которые были положены в основу так называемых диффузионных томографов [3]. Одна из идеологий, положенных в основу такого томографа, заключается в зондировании сильно рассеивающих объемных сред пикосекундными лазерными импульсами (time domain). Наиболее перспективным для экспериментальной реализации является создание диффузионных оптических томографов на основе амплитудно-фазового метода (frequency domain), при котором зондирование происходит с помощью амплитудно-модулированного излучения лазерного диода в диапазоне частот, соизмеримых с обратным временем уширения лазерных импульсов [4]. Известно, что при прохождении лазерного излучения через объемные рассеивающие среды в результате когерентных интерференционных эффектов возникает определенная спекл-структура рассеянного оптического излучения. Такие спекл-корреляционные технологии позволяют из анализа статистических свойств двумерного распределения когерентных рассеянных оптических полей при учете их поляризационных свойств извлекать информацию о структуре рассеивающих объемных сред [5].

В данном сообщении приводятся результаты апробации предлагаемого когерентно-динамического метода определения дисперсии многомодовых световодов и параметров рассеяния при лазерном зондировании стационарных случайных или частично упорядоченных оптически неоднородных объемных сред, основанного на динамике спеклов, возникающей при девиации частоты зондирующего излучения.

1. Поперечная динамика спеклов при зондировании маломодовых световодов лазерным излучением с перестройкой частоты и возможность определения межмодовой дисперсии. Нами впервые был экспериментально обнаружен когерентно-динамический эффект, связанный с зависимостью пространственной структуры спекл-поля излучения, прошедшего многомодовое волокно длиной порядка ста метров при перестройке частоты генерации He–Ne-лазера [6]. При зондировании маломодового ($D = 9\ \mu\text{m}$, $NA = 0.17$) волокна излучением одночастотного He–Ne-лазера ($\lambda = 633\ \text{nm}$) для наблюдения динамики спеклов требуются длины оптического волокна более нескольких километров, при которых диапазон перестройки частоты становится соизмерим с

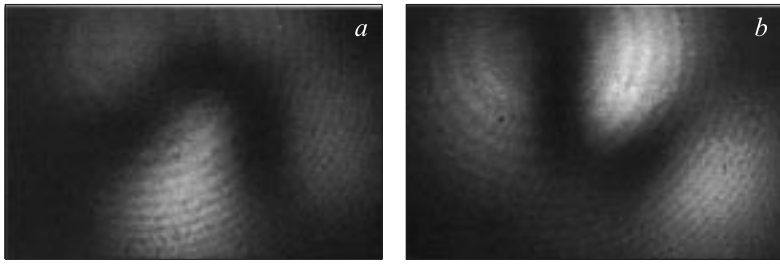


Рис. 1. Динамика пространственной структуры волноводных мод в выходном излучении маломодового ($D = 9 \mu\text{m}$, $NA = 0.17$) ступенчатого световода длиной 1 м при зондировании квантово-размерным лазерным диодом, генерирующим в одночастотном режиме с частотной расстройкой между паттернами (а) и (б) в 126 GHz (коэффициент двумерной корреляции — 0.018).

межмодовой дисперсией. Представляет практический интерес реализация режима пространственной динамики спеклов на коротких длинах волокна. Для этих целей была использована перестройка частоты в сотни GHz, вызванная изменением тока инжекции в квантово-размерных лазерных диодах, или тепловая перестройка твердотельных YAG:Nd лазерных чипов с внутриволноводным генератором второй гармоники при диодной накачке. Типичные картины поперечного распределения спекл-полей для лазерного излучения, прошедшего маломодовый световод с фиксированной длиной для двух частотных настроек резонатора, представлены на рис. 1.

Детальные экспериментальные исследования модового фотохромного эффекта позволили установить, что поперечное смещение спекл-картины пропорционально длине волокна и величине перестройки частоты генерации.

Основной механизм наблюдаемого фотохромного эффекта в оптических волокнах возможно интерпретировать на основе волнового анализа распространения одночастотного лазерного излучения в ступенчатых многомодовых световодах, в представлении линейно-поляризованных LP_{nm} -мод [7]. При перестройке частоты излучения лазера изменение фазы каждой из LP_{nm} -мод, которые распространяются по волокну, в случае если возбуждаемые волноводные моды далеки от отсечки

$u_{nm} \ll V = (2\pi a/\lambda)(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$, можно определить из соотношения

$$\delta\Phi_{n,m} - \delta\Phi_{n',m'} = (u_{n,m} - u_{n',m'})/2n_{co}^2/(2\pi a/\lambda)L\Delta\lambda, \quad (1)$$

где u_{nm} — поперечные константы распространения для центральной жилы ступенчатого волокна с показателем преломления n_{co} и радиусом a , L — длина волокна, $\Delta\lambda$ — диапазон изменения зондирующей длины волны лазера.

Детальные экспериментальные исследования ступенчатых световодов различной длины и диаметра показали, что по величине изменения двумерного коэффициента корреляции частотно-зависимых спекл-полей от величины частотного сдвига возможно определение значения модовой дисперсии многомодовых волокон. Эксперименты, проведенные на типичных многомодовых оптических волокнах (диаметром центральной жилы $D = 50 \mu\text{m}$ и числовой апертурой $NA = 0.2$) различной длины от 100 м до десятков сантиметров и маломодовых ($D = 9 \mu\text{m}$ и $NA = 0.17$) длиной от 5 км до метров показали, что величина поперечной перестройки спекл-поля выходного излучения, оцениваемого через двумерный коэффициент корреляции, линейно связана с величиной частотной расстройки зондирующего излучения. В частности, в наших измерениях максимальный диапазон частотной перестройки 660 МГц при зондировании излучением одночастотного He–Ne-лазера вызывал уменьшение двумерного коэффициента корреляции вдвое на длине многомодового волокна 50 м, что соответствовало величине дисперсии 30 МГц/км, последнее согласуется с результатами измерения дисперсии импульсными и фазовыми методами. Однако эти традиционные методы встречают серьезные экспериментальные трудности уже при измерении многомодовых волокон длиной несколько десятков метров, а тем более при измерении маломодовых волокон. Проведенные эксперименты показали возможность определения дисперсии многомодовых волокон длиной не менее двух метров при использовании YAG:Nd-лазера при диапазоне перестройки частоты 84 GHz, а при зондировании лазерным диодом при перестройке частоты одночастотного квантовомодового лазера возможно определение дисперсии многомодовых световодов длиной двадцать сантиметров и маломодовых волокон длиной несколько метров.

2. Фотохромные спеклы при зондировании оптически неоднородных случайных или упорядоченных объемных сред. При лазерном зондировании оптически неоднородных стационарных случайных

или упорядоченных (фотонные кристаллы) объемных сред впервые обнаружена поперечная динамика спекл-поля при перестройке частоты излучения. Физический механизм наблюдаемого динамического спекл-фотохромного эффекта в рассеивающих средах аналогичен рассмотренному выше при зондировании многомодовых световодов, обладающих существенно более узким пространственным дискретным спектром. Несомненный интерес для оптической томографии представляют исследования динамики спеклов при зондировании стационарных случайных или частично организованных рассеивающих структур, так как такие исследования, возможно, позволят по изменению фотохромных спеклов оценить локальную оптическую неоднородность. Качественные эксперименты при зондировании фторопластовых пленок толщиной менее $100\ \mu\text{m}$ одновременно He–Ne красным лазером и YAG:Nd зеленым лазером, пучки которых пространственно совмещены на входе и имеют сравнимую расходимость, показали наличие красных, зеленых, а также желтых спеклов на выходе образцов в дальней зоне. Желтые „спеклы“ возникают в местах пространственного перекрытия зеленых и красных спеклов от двух лазеров вблизи оси пучков. Разность частот используемых лазеров составляет очень большую величину порядка $98\ \text{THz}$ ($\Delta\lambda \approx 101\ \text{nm}$), поэтому, как показали эксперименты, разность фазовых задержек при зондировании фторопластовых фантомов уже с толщиной менее $20\ \mu\text{m}$ при рассеянии красного и зеленого лазеров будет такова, что пространственное положение спеклов совпадает только в малоугловом рассеянии (несколько градусов) вблизи оси зондирующих пучков, где практически все двухволновые спеклы перекрываются, а при больших углах рассеяния фазовые задержки, составляющие десятки фемтосекунд, приводят к пространственному расхождению красных и зеленых спеклов. С ростом толщины фантомов радиус поперечной корреляции и соответственно средний размер спеклов будут достаточно быстро уменьшаться, но при этом возрастает и величина фазовых задержек. В случае если зондирование производится на двух существенно более близких частотах, которые не различает глаз ($\sim 1\ \text{THz}$), необходима фиксация двух последовательных спекл-паттернов, а их разностная картина и соответствующий двумерный коэффициент корреляции несут информацию о дифференциальных фазовых задержках в рассеивающей среде. При непрерывной перестройке частоты зондирующего лазера в диапазоне, большем, чем обратная величина разностных фазовых задержек, наблюдается стохастическая динамика спеклов, которая воспринимается как „кипение“ спеклов.

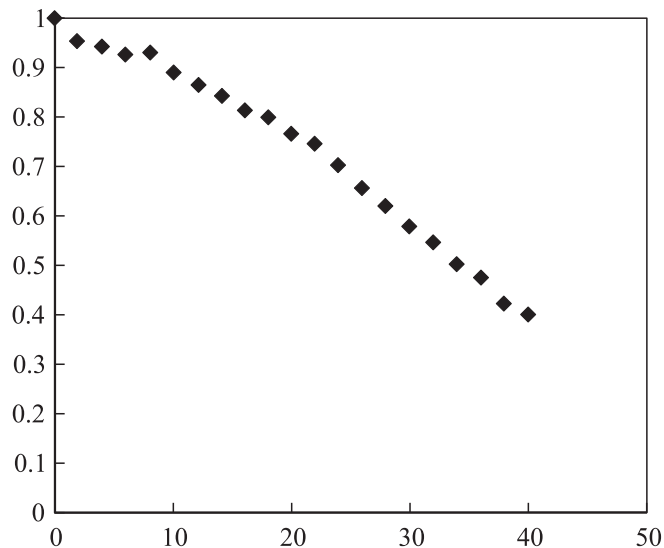


Рис. 2. Зависимость двумерного коэффициента корреляции рассеянных спекл-полей при зондировании тестовой фторопластовой пластины толщиной 0.5 см от перестройки частоты генерации лазерного диода в GHz, вызванной изменением тока инжекции.

Нами экспериментально исследовалась динамика спекл-структур при зондировании фторопластовых пластин с различной толщиной от десятков микрон до двух сантиметров. В качестве зондирующих лазеров использовались лазеры с максимальной межмодовой частотной перестройкой — полупроводниковый лазерный диод ($\Delta\nu = 126$ GHz, $\delta\lambda = 0.18$ nm) и компактный твердотельный YAG:Nd с диодной накачкой ($\Delta\nu = 84$ GHz, $\delta\lambda = 7.97 \cdot 10^{-2}$ nm) с выходной мощностью 10^{-3} W. Типичные экспериментальные результаты по динамике спеклов с использованием лазерных диодов с токовой перестройкой частоты для многократно рассеивающих фторопластовых фантомов представлены на рис. 2.

Апробация спекл-фотохромного метода определения эффективных фазовых задержек или структурной дисперсии, связанной с кратностью рассеяния в стационарных случайных или частично-организованных оптически неоднородных объемных средах при лазерном зондировании

излучением лазеров с перестраиваемой частотой и детектировании соответствующих двумерных спекл-паттернов, показала его конкурентные возможности по сравнению с традиционными нестационарными лазерными методами диагностики.

Автор выражает признательность сотрудникам кафедры лазерной физики и оптики СГУ Л.А. Мельникову и Е.А. Романовой за обсуждение результатов, Д.А. Зимнякову за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента России № 25.2003.2 „Ведущие научные школы“ и U.S. Civilian Research&Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (N REC-006).

Список литературы

- [1] *Fercher A.F.* // J. Biomed. Opt. 1996. V. 1. P. 157–173.
- [2] *Геликонов В.М., Геликонов Г.В., Гладкова Н.Д.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 61. С. 149–153.
- [3] *Optical Biomedical Diagnostics. Handbook* / Ed. V.V. Tuchin. SPIE Press monography V PM 107. 2003. P. 1057.
- [4] *Акчурин Г.Г., Зимняков Д.А., Тучин В.В.* // Биомедицинская радиоэлектроника. 2000. № 1. С. 46–53.
- [5] *Zimnyakov D.A.* et al. // Applied Nonlinear Dynamics. 2002. V. 10. P. 188–194.
- [6] *Akchurin G.G., Melnikov L.A., Romanova E.A.* // Proc. SPIE. 1996. V. 2693. P. 741–746.
- [7] *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.