

ГЛАВА 5.

ЛАЗЕРНАЯ ОПТОАКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА.

§5.1. ОБЗОР РАБОТ ПО ОПТОАКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА.

Проблема визуализации (воссоздания) картины распределения неоднородностей среды с помощью исследования рассеяния излучения той или иной природы является одной из центральных в физике. Она встречается практически во всех разделах физики - квантовой механике, распространении радиоволн, акустике океана, термографии и т.д. Для решения этой задачи разработаны многочисленные методы; однако, как правило, с математической точки зрения задача восстановления распределения неоднородностей является некорректно поставленной и требует достаточно изощренных процедур численной обработки данных. Большую популярность в последнее время (также в различных разделах физики) получили томографические методы диагностики, основанные на регистрации рассеяния излучения исследуемой средой с различных направлений. Конечной задачей при этом является восстановление трехмерного распределения неоднородностей. Соответственно весь круг методов, позволяющих восстанавливать такое распределение (даже не связанных с "просвечиванием" объекта), получил название томографических.

Изменение углового и частотного спектров светового излучения при распространении в неоднородной среде обусловлено процессами рассеяния и поглощения. Каждый из этих процессов вносит соответствующий вклад в уменьшение интенсивности волны, проходящей

на приемник. Особый интерес представляет разделение этих вкладов. Оно наиболее затруднено, если один из процессов значительно эффективнее другого. Это имеет место, например, в случае биологических тканей - коэффициент рассеяния света для них как правило в 10-100 раз превышает коэффициент поглощения^[65-67]. С этим связана трудность диагностики поглощающих неоднородностей в таких средах.

Широко обсуждающиеся в настоящее время методы диагностики светопоглощающих неоднородностей в рассеивающих средах основаны на регистрации рассеянного средой светового поля. К ним относятся различные методы Photon migration ^[68-70], Time-resolved photon migration ^[71-73], Optical coherence tomography^[74-79] и родственные им. Измеряемым параметром в этом случае (как уже говорилось выше) фактически является коэффициент рассеяния света^[80]. Поэтому такого рода методы эффективны для достаточно прозрачных сред и чувствительны в первую очередь к неоднородностям показателя преломления. Наиболее впечатляющие результаты в использовании этих методов получены при диагностике повреждений глаз^[81,82]. Достигнутое пространственное разрешение составляет десятки микрон как по плоскости, так и по глубине. Однако, для применения лазеров в медицине существенное значение имеет величина (и распределение по объему) коэффициента поглощения света μ_a . Поэтому проблема разработки оперативных методов диагностики поглощающих неоднородностей в биологических тканях продолжает оставаться актуальной.

Одним из наиболее перспективных методов исследования поглощающих неоднородностей в рассеивающих средах является оптоакустический. Он основан на возбуждении в исследуемой среде тепловых и акустических волн при поглощении модулированного по интенсивности (или перемещающегося в пространстве) лазерного

излучения. Возбуждение звука происходит за счет теплового расширения среды при нестационарном и неоднородном ее нагреве. Лазерный оптоакустический эффект подробно исследован и описан в литературе (см., например, книги и обзоры^[8,14,17,83-85]), правда исследования в основном касались однородных сред. Достоинством оптоакустического метода является непосредственная зависимость амплитуды возбуждаемой волны именно от коэффициента поглощения света - в случае рассеивающей среды без поглощения оптоакустический сигнал будет отсутствовать.

Оптоакустические методы исследования распределения поглощения света основаны на анализе эффективности возбуждения лазерным излучением в среде тепловых или акустических волн с высоким временным разрешением (или в широкой полосе частот модуляции его интенсивности).

Частотный спектр возбуждаемых лазером тепловых волн пропорционален Лаплас-образу распределения источников тепла в поглощающей среде^[86-90]. Поэтому восстановление распределения поглощения связано с обращением преобразования Лапласа и встречает известные математические сложности^[87]. Подобный вариант оптоакустической томографии удалось эффективно реализовать только для достаточно тонких образцов (в частности, оптически тонких).

Частотный спектр возбуждаемых лазером акустических волн определяется преобразованием Фурье пространственного распределения источников тепла. Поэтому решение обратной задачи существенно проще, нежели в случае регистрации тепловых волн, а при коротких лазерных импульсах - предельно просто^[8]. При оптоакустической диагностике неоднородностей среды коротким лазерным импульсом неоднородности пространственного распределения тепловых источников преобразуются во

временную модуляцию принимаемого акустического сигнала. Это обусловлено задержкой прихода на приемник парциальных возмущений, возбуждаемых в различных точках исследуемой среды. Временной масштаб изменения акустического сигнала и пространственный масштаб изменения тепловых источников связаны между собой через скорость звука в среде.

Впервые связь между пространственным распределением тепловых источников и временной формой возбуждаемого лазерным импульсом акустического сигнала была найдена, по-видимому, в^[91,92]. Метод определения коэффициента поглощения света (для однородной среды) по форме оптоакустического сигнала впервые был предложен и экспериментально реализован в^[93] (для биотканей см.^[94]). Экспериментальное восстановление распределения коэффициента поглощения света по форме оптоакустического сигнала для неоднородной модельной среды впервые было проведено в 1987г.^[95] (подробное описание этих экспериментов приведено в^[8]). Среда представляла собой набор стеклянных пластин, промежутки между которыми были заполнены водным раствором хлорной меди различных концентраций (см. рис.5.1), которые создавали пространственно неоднородное поглощение для излучения Nd-YAG лазера.

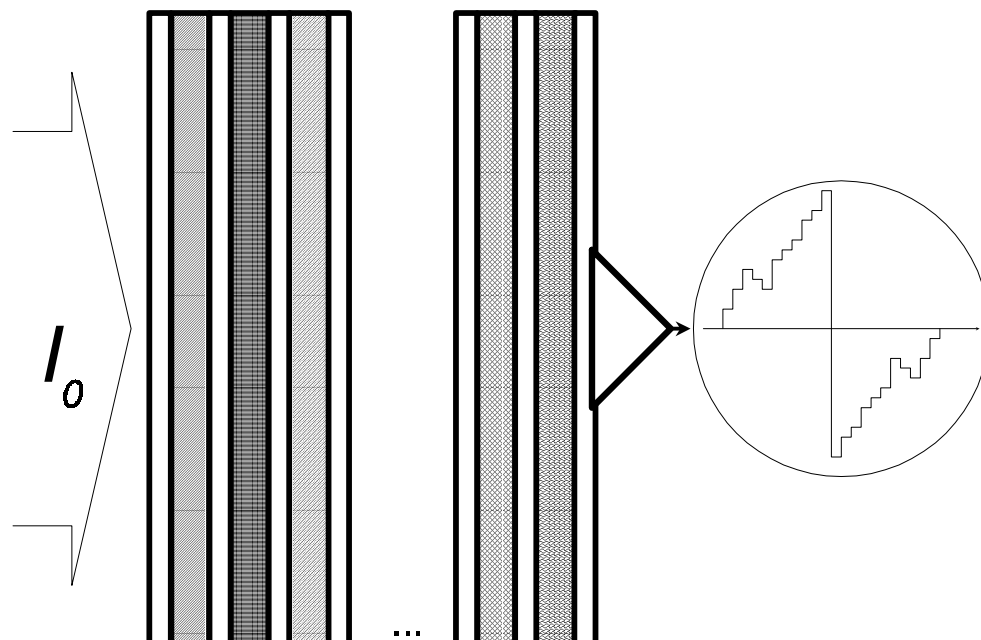


Рис.5.1. Схема модельной слоисто-неоднородной среды.

Звук регистрировался на противоположной облучаемой стороне стопы (томография “на просвет”). Изменяя концентрацию раствора в различных слоях удавалось достаточно произвольно изменять форму возбуждаемого акустического сигнала. По форме этого сигнала, используя аналитические соотношения, полученные ранее^[91], были рассчитаны распределения коэффициента поглощения света. Результаты расчетов хорошо совпали с заложенным заранее распределением (см. рис.5.2). Подобные эксперименты по диагностике слоев collagen gel с различной концентрацией красителя описаны в^[96,97].

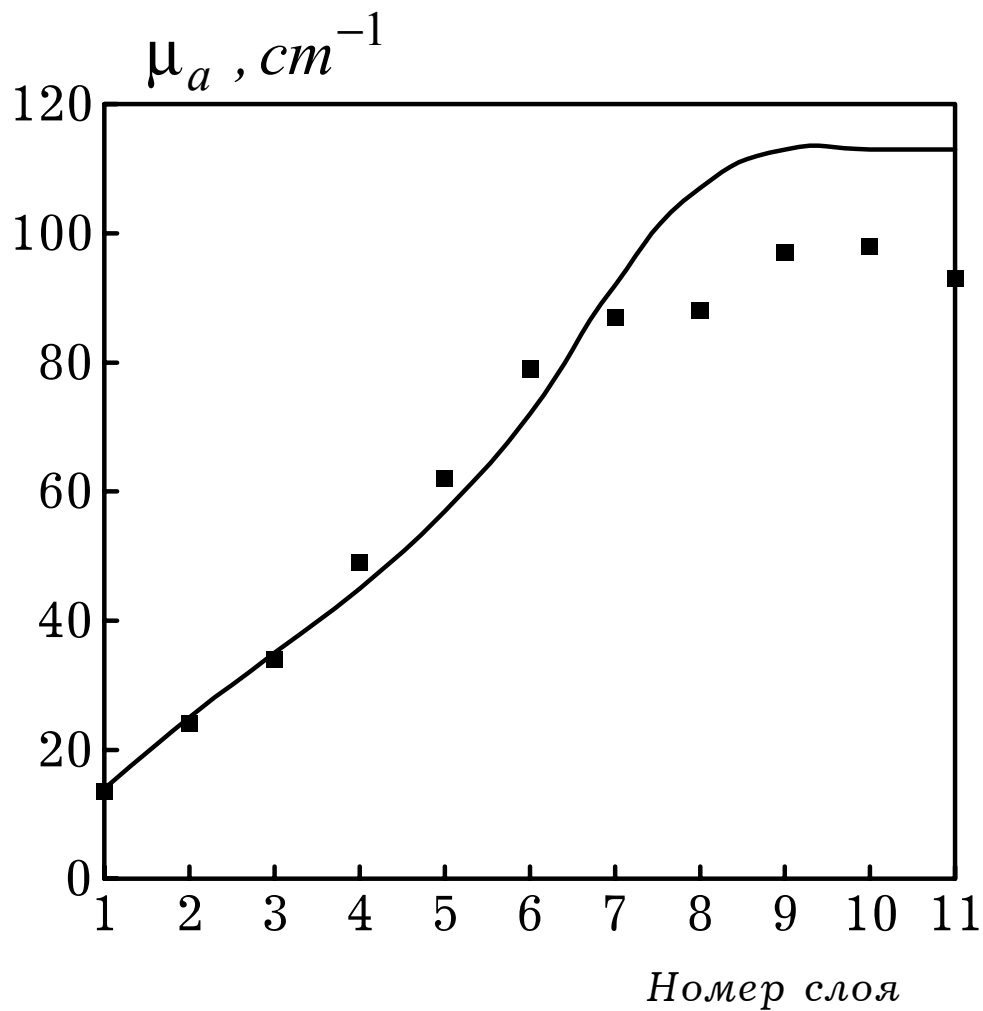


Рис.5.2. Восстановление распределения поглощения света в модельной слоисто-неоднородной среде (сплошная линия); точки - реальное значение поглощения по слоям.

В описанных экспериментах регистрация звука производилась со стороны поглощающей среды, противоположной облучаемой поверхности (см. рис.5.1 и рис.5.3).

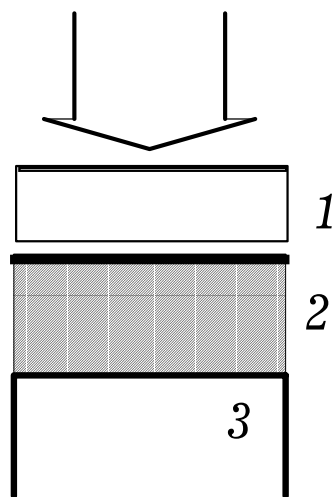


Рис.5.3. Схема оптоакустической томографии поглощения света при прямой схеме регистрации акустического сигнала. 1 - прозрачная среда; 2 - исследуемая среда; 3 - широкополосный пьезоприемник.

В практических применениях, однако, к исследуемой среде имеется доступ, как правило, только с одной стороны. Поэтому необходима определенная модификация метода регистрации акустического сигнала, позволяющая реализовать и такой метод диагностики. Она была предложена в^[96,97] и независимо экспериментально реализована в^[98,99]. Ее схема приведена на рис.5.4: поверхность исследуемой среды облучается через боковую поверхность и основание прозрачной призмы, на противоположном основании которой закреплен широкополосный акустический приемник. Обычно используются пьезоэлектрические приемники ввиду их высокой чувствительности, простоты и достаточной миниатюрности. Возможно, однако, использование и более изощренных (например, оптических интерферометрических) способов регистрации акустических сигналов. В этом случае будет возможна полностью бесконтактная оптоакустическая томография.

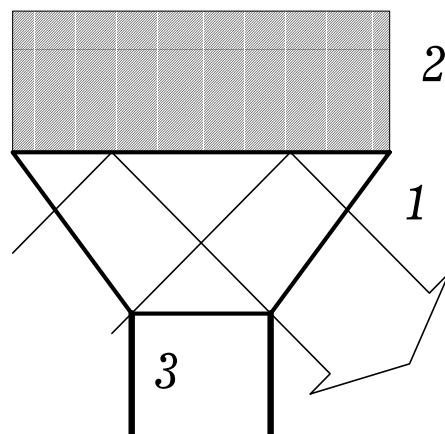


Рис.5.4. Схема оптоакустической томографии поглощения света при косвенной схеме регистрации акустического сигнала. 1 - прозрачная среда; 2 - исследуемая среда; 3 - широкополосный пьезоприемник.

В описанных экспериментах исследовались плоско-слоистые среды и поперечный размер лазерного пучка был достаточно велик - возбуждаемая акустическая волна имела плоский фазовый фронт. Полученные результаты достаточно наглядны, а схемы восстановления распределения коэффициента поглощения света - просты. В случае неоднородной среды, содержащей поглощающие частицы, процедура восстановления распределения коэффициента поглощения света не так тривиальна^[100]. Более того, даже теория оптоакустического эффекта в такой среде разработана еще не полностью.

С точки зрения генерации звука лазерным излучением основное отличие микронеоднородной и однородной сред состоит в появлении "запаздывающих" тепловых источников в жидкости, окружающей поглощающие частицы, и связанных с передачей ей тепла от частиц. Расчет этого вклада в генерацию звука в микронеоднородной среде был

проведен в^[101,102]. Распределение частиц (а значит и коэффициента поглощения света) предполагалось, однако, однородным и задача томографии не ставилась. Анализ различных предельных случаев для томографии поглощающих частиц в жидкости проведен авторами работы^[100]. В ней были получены формулы для восстановления распределения сечения поглощения света частицами в микронеоднородной среде по форме оптоакустического сигнала. Среда, содержащая поглощающие центры, может быть прозрачной, рассеивающей или поглощающей.

Экспериментально оптоакустическая томография была реализована для модельных прозрачных, однородно поглощающих и рассеивающих свет сред, содержащих поглощающие частицы^[98-100], а также для визуализации отдельных поглощающих частиц в рассматриваемой среде^[101-103]. Эти среды представляли собой взвесь частиц графита (или сажи) в воде, молоке и водном растворе хлорной меди. Также было проведено восстановление пространственного распределения коэффициента поглощения света в реальных однородных средах (водных растворах хлорной меди различной концентрации) и макронеоднородных средах (магнитных жидкостях на основе трансформаторного масла)^[104]. Оптоакустическая томография осуществлялась с помощью Nd-YAG лазера, работающего в режиме модуляции добротности (длительность импульса $\tau_L \approx 10-12$ нс, длина волны излучения $\lambda = 1.06$ мкм). Данная методика позволяет восстанавливать распределение коэффициента поглощения света при его изменении от единиц до сотен обратных сантиметров с разрешением по глубине на уровне 15-20 мкм. Полученное разрешение лежит на уровне лучших значений для методов Photon migration и Optical coherence tomography.