

§ 5.4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА.

Обзор работ по лазерной оптоакустической томографии поглощения света был сделан в §5.1. Основная трудность технической реализации этого метода состоит в корректной регистрации одиночных акустических сигналов с высоким временным разрешением. Эти же трудности с большей или меньшей степенью успеха преодолеваются в различных областях акустической диагностики (акустический неразрушающий контроль, акустическая дефектоскопия, акустическая спектроскопия, медицинская акустика). Однако практически решить задачу регистрации акустических сигналов с наносекундным временным разрешением удалось лишь сравнительно недавно.

Большие надежды возлагались на различные оптические (в первую очередь интерференционные) методы регистрации акустических колебаний (см., например,^[107-113] и имеющиеся в них ссылки). К сожалению, чувствительность таких систем регистрации на 2-3 порядка ниже, чем у традиционных пьезоэлектрических при той же полосе частот. Кроме того, использование оптических методов регистрации как правило требует высокого (оптического) качества исследуемой поверхности. Поэтому их использование для оптоакустической томографии биологических объектов представляется затруднительным.

По этим причинам для оптоакустической томографии были использованы широкополосные акустические пьезоприемники на основе ниобата лития, работающие в режиме короткого замыкания (типа WAT-

04). Они обеспечивают регистрацию акустических импульсов с длительностью до 0.8-0.9 мкс при временном разрешении не хуже 3 нс. Высокая чувствительность этих приемников (типичное значение порядка 10^{-7} В/Па) позволяла работать при сравнительно низких уровнях энергии лазерных импульсов (порядка 10 - 50 мДж).

Схема установки оптоакустического томографа достаточно проста (рис.5.9).

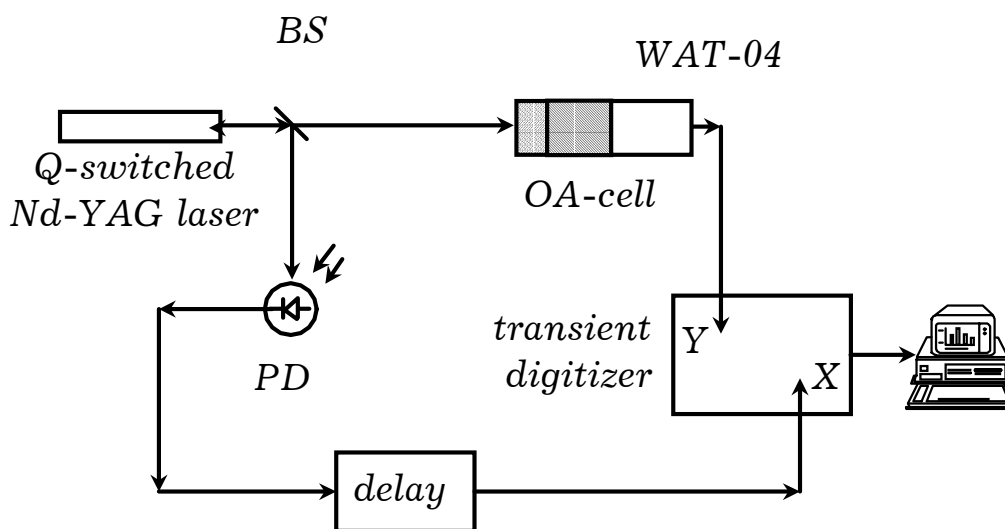


Рис.5.9. Схема установки для оптоакустической томографии неоднородностей поглощения света.

Импульс Nd:YAG лазера с модуляцией добротности ($\lambda = 1.06$ мкм) направляется в оптоакустическую ячейку, содержащую исследуемую среду. Схемы ячеек приведены на рис.5.3-5.4. Для регистрации возбуждаемой акустической волны используется широкополосный пьезоприемник типа WAT-04 (полоса регистрируемых частот 1-100 МГц, длительность импульса - 7нс-0.9мкс). Лазерный импульс имел практически симметричную форму с длительностью по уровню $1/e$: $\tau_L = 12$ нс, диаметр пучка - 2.0 ± 0.1 мм. Энергия лазерного

импульса $E \approx 50$ мДж ослаблялась до требуемой величины нейтральными светофильтрами. Электрический сигнал регистрировался аналого-цифровым преобразователем (аналоговая полоса - 100 МГц) и обрабатывался РС. Часть излучения делительной пластиной направлялась на фотодиод для контроля энергии излучения и синхронизации работы системы.

Основным условием корректной регистрации широкополосного акустического сигнала является параллельность плоскости фазового фронта волны и плоскости приемного элемента. В нашем случае это достигалось прецизионной юстировкой в случае непосредственной регистрации и тщательным изготовлением призмы (см. рис.5.4) в случае косвенной регистрации. Контрольные эксперименты, проведенные с использованием сред с известными коэффициентами поглощения света, показали, что временное разрешение системы регистрации акустических волн определяется, в основном, ограниченностью полосы приема электрического сигнала (100 МГц) и длительностью лазерного импульса. В нашем случае оно составляет 7-10 нс.

Таким образом, практически пространственное разрешение оптоакустической томографии может достигать 10-15 мкм при глубине зондирования до 1.2-1.5 мм. Ниже описываются результаты исследования модельных неоднородных сред методом оптоакустической томографии с временным разрешением.

Детектирование отдельных поглощающих частиц методами оптоакустики производилось в основном в целях определения наличия примесей в жидкостях^[84]. Регистрировалось изменение амплитуды сигнала в поперечной схеме (см. рис.5.10) при попадании в луч частицы примеси. Использование поперечной схемы регистрации

не позволяло фиксировать положение частиц в пучке, поэтому задача томографии в этих работах не ставилась.

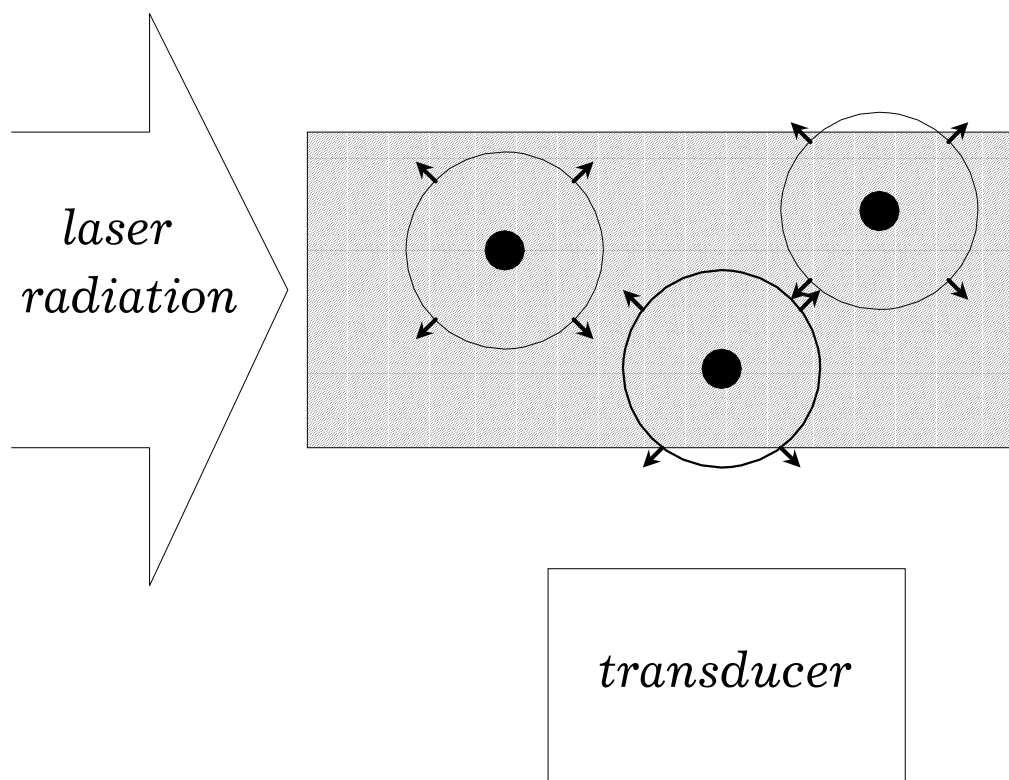


Рис.5.10. Поперечная схема оптоакустического детектирования поглощающих центров в прозрачной среде.

В любом случае акустические сигналы, приходящие на приемник от равноудаленных от него центров, сливаются. Поэтому для фиксации положения частицы в луче регистрацию оптоакустического сигнала целесообразно производить в направлении, перпендикулярном границе поглощающей среды. Однако при слабом поглощении и непосредственной регистрации будет происходить сильная засветка акустического приемника, приводящая к появлению мешающих сигналов. Поэтому оптоакустическую томографию при слабом поглощении света целесообразно

производить в схеме косвенной регистрации (см. рис.5.4).

Типичные формы оптоакустического сигнала при косвенной регистрации в случае однородно поглощающей среды и рассеивающей среды с поглощающей частицей приведены на рис.5.11.

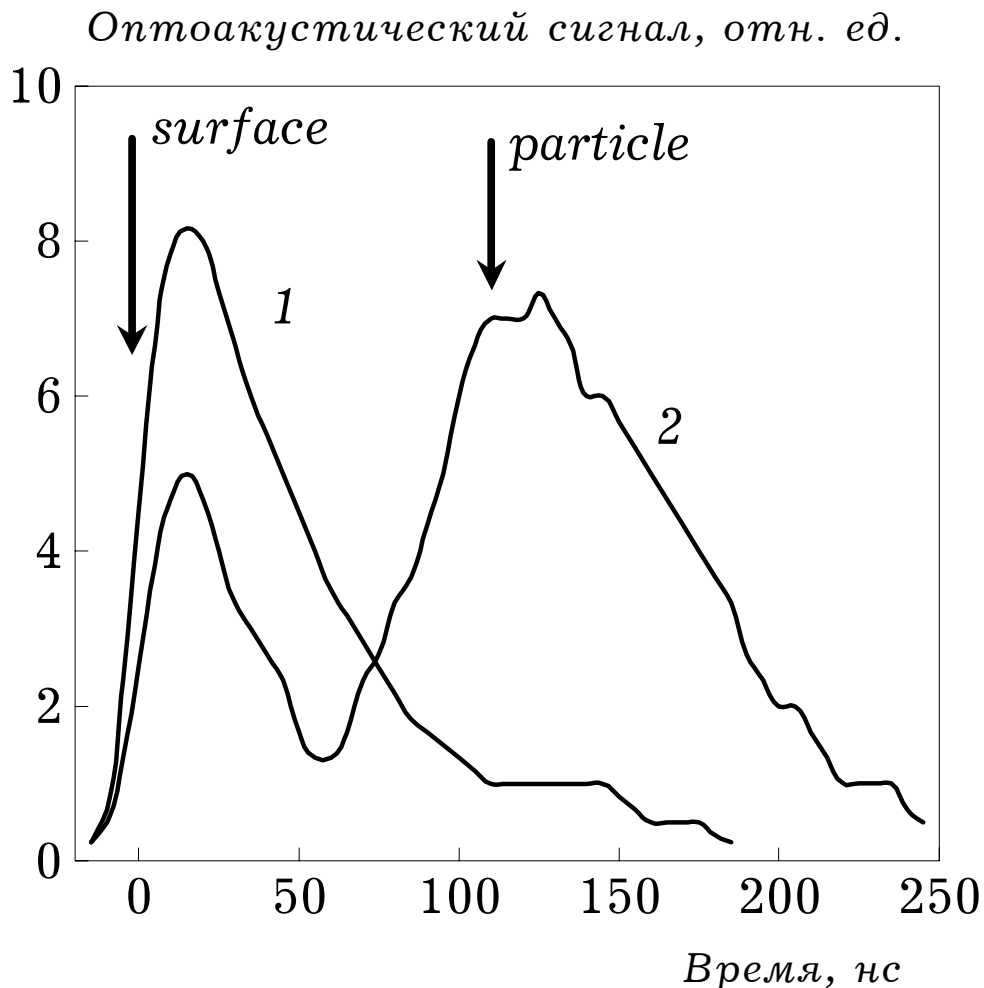


Рис.5.11. Оптоакустические сигналы, возбуждаемые в рассеивающей поглощающей среде (1) и поглощающим центром в рассеивающей среде (2); косвенная регистрация.

Сигнал состоит из фронта, определяемого интегралом от формы лазерного импульса (в нашем случае ширина фронта составляла 20-25 нс) и части сигнала, определяемого поглощением света. Середина фронта соответствует поверхности $z = 0$ при отсчете глубины

залегания поглощающих центров от поверхности призмы

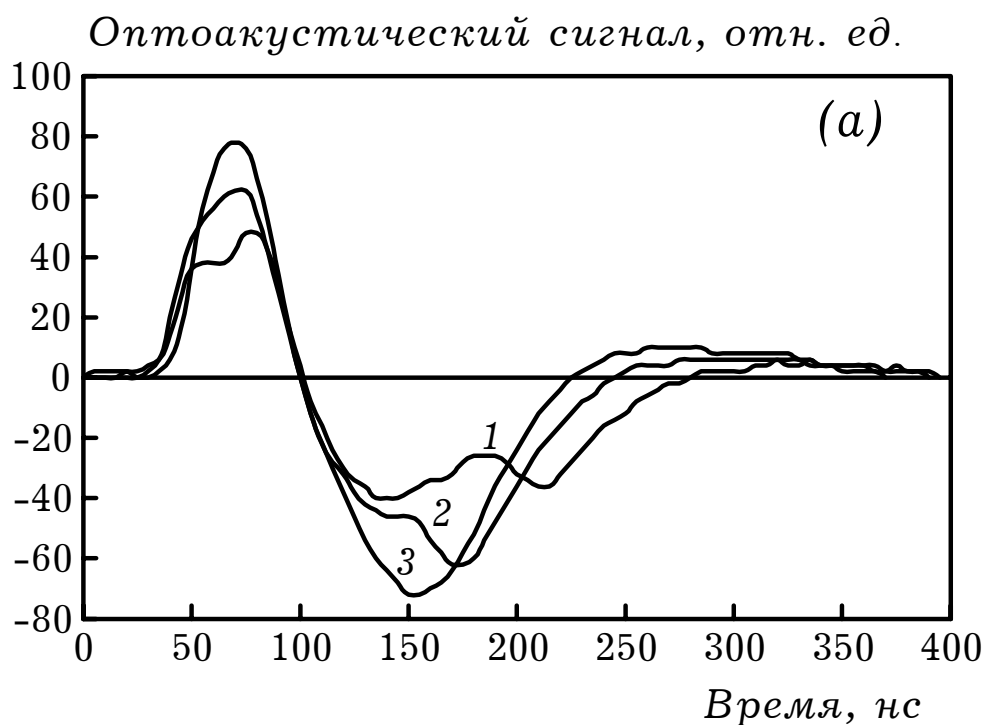
Спад сигнала в случае однородно-поглощающей среды (раствор хлорной меди в молоке, коэффициент поглощения излучения Nd:YAG лазера $\mu_a = 3 \text{ см}^{-1}$, рис.5.11, кривая 1) имел плавный характер. Величина сигнала убывала в e раз за время $\tau_e \sim 50 \text{ нс}$, что существенно меньше времени релаксации механических напряжений $\omega_a^{-1} = 2.2 \text{ мкс}$. Поэтому параметр дифракции $D \gg 1$ и спад сигнала определяется дифракцией акустической волны. Амплитуда сигнала, однако, пропорциональна коэффициенту поглощения света. Так, в случае чисто рассеивающей среды (молоко) оптоакустический сигнал не удалось выделить на уровне шумов.

Наличие поглощающей частицы (графит) в рассеивающей среде приводит к резкому изменению формы сигнала (см. кривую 2 на рис.5.11). С задержкой порядка 100 нс (что соответствует расстоянию от поверхности призмы в 150 мкм) появляется пик, обусловленный поглощением излучения на частице. Ширина пика ($\approx 70 \text{ нс}$ по уровню $1/e$) соотносится с размером частицы ($R_p \approx 0.1 \text{ мм}$). Эти результаты носят, однако, лишь качественный характер, поскольку за время действия лазерного импульса неоднородности механических напряжений в пределах частицы не успевали релаксировать $(c_{0p} \tau_L < R_p)$.

Рис.5.11 демонстрирует возможности обнаружения отдельных поглощающих частиц даже в мутных (рассеивающих) средах с помощью оптоакустической томографии с временным разрешением.

Количественные результаты по восстановлению распределения поглощения света могут быть получены с помощью формул (5.21) -

(5.22). При этом, однако, поглощающие частицы предполагались акустически мелкими. Результаты оптоакустической томографии мелких частиц при использовании косвенной схемы регистрации представлены на рис.5.12. Частицы сажи со средним диаметром порядка 0.5 мкм впрыскивались в воду и мигрировали к поверхности раздела призма-вода. Миграция происходила как под действием силы тяжести, так и за счет светокапиллярного эффекта в поле лазерного излучения.



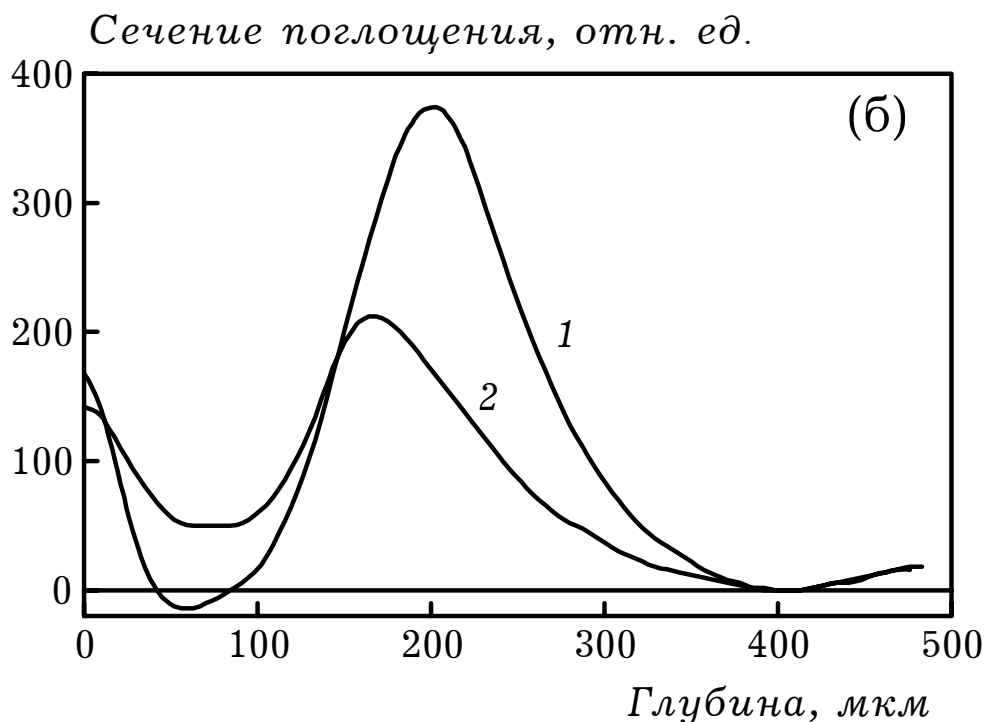


Рис.5.12. Оптоакустическое исследование миграции поглощающих частиц. (а) - оптоакустические сигналы в последовательные моменты времени: 1 - через 11с, 2 - 22с, 3 - 44с после инъекции частиц в среду; (б) - соответствующие распределения поглощения для 1 - 11с, 2 - 22с.

По мере миграции частиц к границе форма оптоакустического сигнала изменялась (кривые 1 - 3 на рис.5.12а сняты в последовательные моменты времени после впрыскивания частиц). При $t \geq 44$ с форма сигнала стабилизировалась, что связано с оседанием всех частиц на поверхности. Эта форма определяется влиянием дифракции, конечностью длительности лазерного импульса и ограниченностью полосы принимаемых частот.

Отличия в формах установившегося сигнала и сигналов в предыдущие моменты времени связаны с неоднородным распределением поглощающих частиц по объему. Поскольку

отдельные частицы при облучении испускают сферические волны, то временная зависимость этой разницы связана соотношением (5.22) с пространственным распределением сечения поглощения света частицами. Обращение этого соотношения позволяет восстановить распределение поглощения света (см. рис.5.12б). Восстанавливаемая величина есть интегральное сечение поглощения света частицами, попадающими в лазерный пучок, усредненное с весовым распределением энергии излучения по пятну. Наглядно видно, как это распределение смещается со временем к границе. В первом приближении можно считать, что сечение поглощения повторяет распределение концентрации частиц.

Оперативность измерения определяется практически быстродействием системы регистрации и частотой повторения лазерных импульсов. В нашем случае временные отрезки выбирались из условия заметного изменения распределения поглощения света. Таким образом, оптоакустическая томография позволяет исследовать распределение поглощающих частиц в прозрачной среде в реальном масштабе времени.

Восстановление распределения частиц в однородно поглощающей свет среде иллюстрирует рис.5.13.

Оптоакустический
сигнал, отн. ед.

Сечение поглощения
отн. ед.

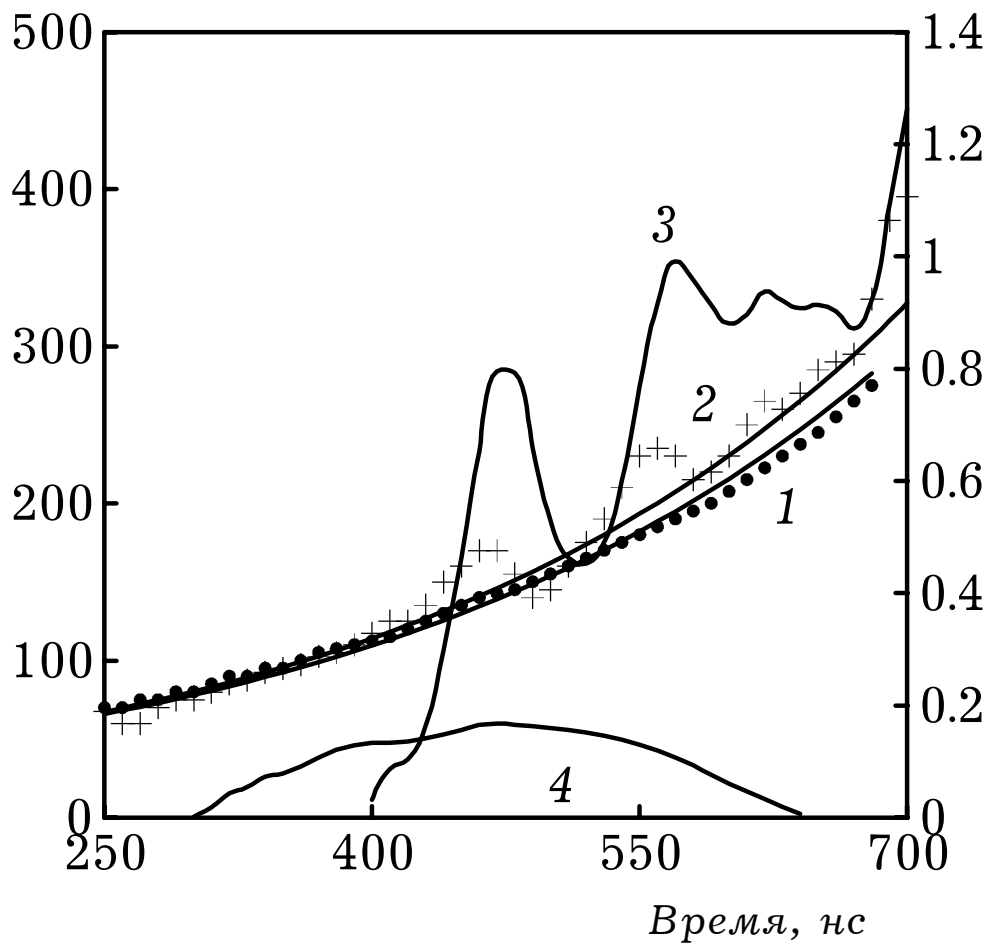


Рис.5.13. Фронты оптоакустического сигнала в однородно поглощающей среде (•) и при наличии поглощающих частиц (+). Сплошные линии 1,2 - экспоненциальные аппроксимации, 3,4 - сечение поглощения.

Поскольку поглощение даже в отсутствие частиц препятствует засветке акустического приемника, используется непосредственная схема регистрации, позволяющая эффективнее преодолевать влияние дифракции. При непосредственной регистрации для восстановления распределения поглощения света целесообразно использовать передний фронт оптоакустического

сигнала.

В однородно поглощающей среде - водном растворе CuCl_2 - фронт сигнала имеет экспоненциальную форму (точки на рис.5.13 - эксперимент, кривая 1 - экспоненциальная аппроксимация). Скорость нарастания экспоненты определяется коэффициентом поглощения света μ_a , который в данном случае составляет 23 см^{-1} . Как видно, экспериментальные данные хорошо ложатся на экспоненту.

Добавление мелких частиц (сажа, 0.5 мкм в диаметре) в этот раствор приводит как к некоторому росту поглощения света (и амплитуды оптоакустического сигнала, см. рис.5.13, крестики), так и к появлению нерегулярных пульсаций в форме сигнала. Последние связаны с неоднородностями распределения частиц по объему. Эти отличия в оптоакустическом сигнале от сигнала в случае однородно-поглощающей среды без частиц очевидны.

Для восстановления распределения неоднородностей поглощения можно воспользоваться формулой (5.23); величина $\langle \mu_a \rangle$ определяется по аппроксимации фронта (соответствующая экспонента - кривая 2 на рис.5.13). Расчет сечения поглощения для приведенных экспериментальных данных представлен кривой 3 на рис.5.13. Видны нерегулярные неоднородности распределения с характерными пространственными масштабами $100\text{-}150 \text{ мкм}$ на глубину вплоть до 0.6 мм . Глубина зондирования определяется глубиной проникновения света и составляет примерно $2\mu_a^{-1}$. Пространственное разрешение схемы составляет $10\text{-}15 \text{ мкм}$; однако детали такого малого размера в исследованном распределении отсутствуют. Ошибки измерения характеризуются "восстановлением" распределения поглощения для однородно поглощающей среды

(кривая 4). Как видно, полученные значения существенно меньше, чем на кривой 3.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет просто и оперативно исследовать распределения поглощающих центров, как одиночных, так и их скоплений в прозрачных, поглощающих и рассеивающих средах. Если концентрация частиц велика и выполняется условие микрооднородности среды, то оптоакустическая томография будет выявлять "макронеоднородности" их распределения.

Восстановление распределения поглощения света в микрооднородной среде удобно производить в схеме непосредственной регистрации оптоакустического сигнала, так как в этом случае легче уменьшить влияние дифракции на форму импульса. Как и в других случаях, целесообразно исследовать форму фронта оптоакустического сигнала. Ограничения на доступные для измерения величины коэффициента поглощения света определяются несколькими факторами. С одной стороны, конечность длительности лазерного импульса τ_L и ограниченность полосы частот системы регистрации Δf определяют верхнюю границу диапазона допустимых значений μ_a :

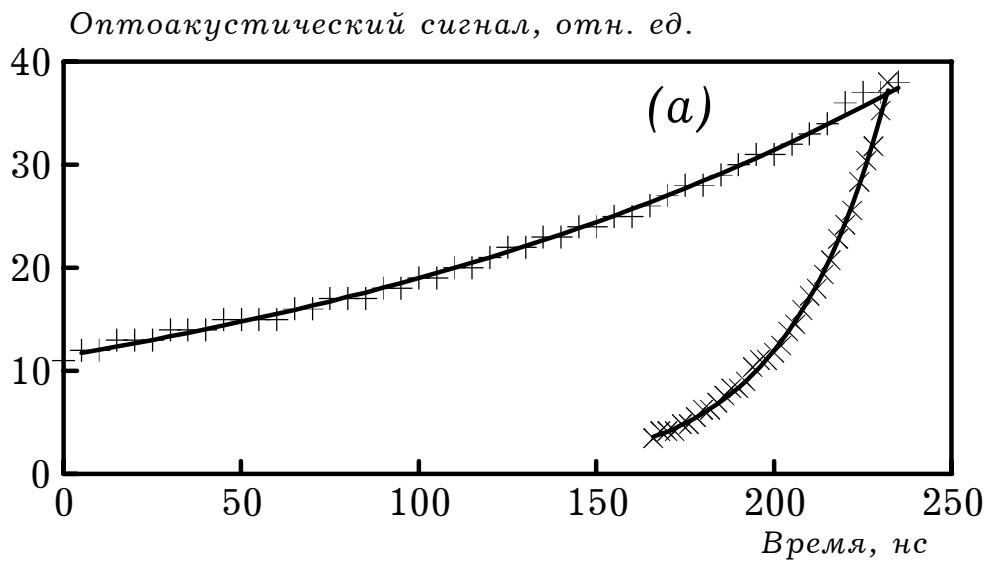
$$\mu_a < \min \left[\frac{1}{2} (c_0 \tau_L)^{-1}, \frac{\pi \Delta f}{c_0} \right].$$

Для наших условий ($\Delta f = 100$ МГц, $\tau_L = 6$ нс) это дает $\mu_a < 500$ см⁻¹.

С другой стороны, сильная дифракция низкочастотных составляющих спектра акустического сигнала и чувствительность приемной системы (амплитуда сигнала пропорциональна μ_a) ограничивают диапазон измерений снизу. Как было указано выше,

практически нижняя граница лежит на уровне $1-3 \text{ см}^{-1}$. Правда недостаточная чувствительность системы регистрации может быть компенсирована повышением энергии лазерных импульсов.

Оптоакустическая диагностика поглощения света в однородных средах (водные растворы хлорной меди различных концентраций) иллюстрируется рис.5.14. На рис.5.14а показано, как изменяется длительность фронта оптоакустического сигнала при изменении концентрации поглотителя от 1.7 до 12.5%. Представление данных в полулогарифмических координатах (рис.5.14б) показывает, что форма фронта близка к экспоненциальной и соответствует теоретической для однородной среды. Восстановление распределения поглощения по формуле (5.10) (рис.5.14в) дает практически постоянное значение коэффициента поглощения света по глубине среды. Относительные вариации восстановленного значения μ_a не превышают 5%.



Оптоакустический сигнал, отн. ед.

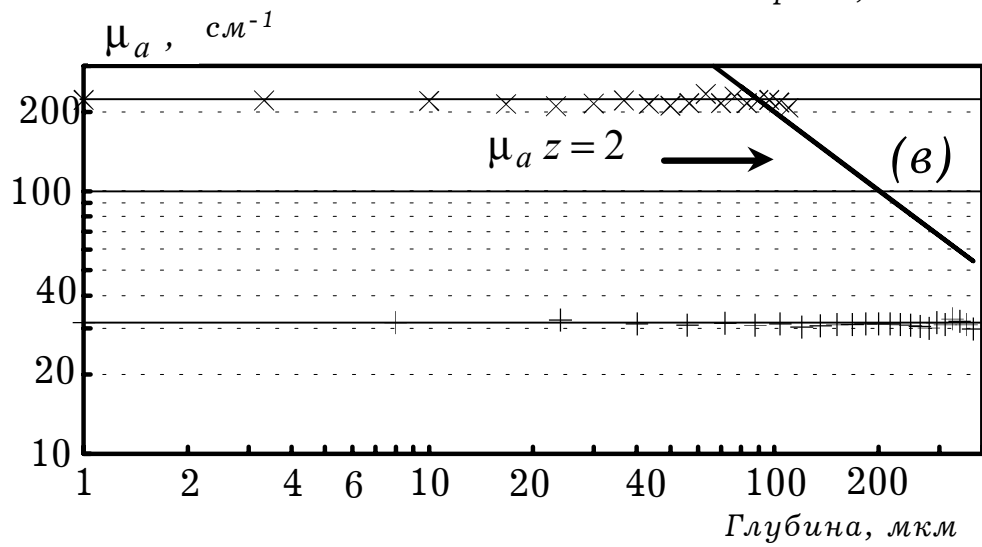
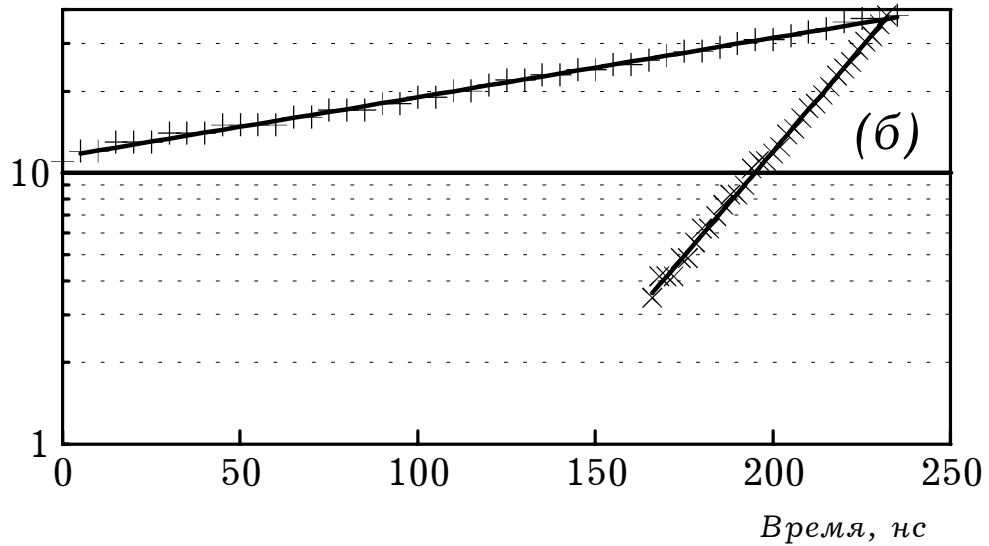


Рис.5.14. Оптоакустический сигнал в однородно поглощающей среде (+) - $\mu_a = 31.5 \text{ см}^{-1}$, (x) - 227 см^{-1} . (а) - линейный масштаб; (б) - полулогарифмический. Сплошные линии - экспоненциальные аппроксимации. (в) - восстановление распределения поглощения в однородной среде.

Максимальная глубина зондирования l_m определяется величиной коэффициента поглощения света и динамическим диапазоном системы регистрации акустических возмущений S :

$$l_m = \mu_a^{-1} \ln S.$$

Чем меньше коэффициент поглощения света (чем глубже проникает свет), тем на большую глубину возможно зондирование. Ослабление

света по мере распространения и соответствующее уменьшение амплитуды оптоакустического сигнала от глубоко лежащих слоев приводит к зависимости максимальной глубины зондирования от динамического диапазона: необходимо, чтобы сигнал от этих слоев мог быть выделен на фоне шумов. Практически динамический диапазон широкополосных систем регистрации акустического сигнала составляет $S = 10 - 20$ и, соответственно, $l_m = (2.5 \div 3) \mu_a^{-1}$. Некоторые дополнительные ограничения возможны при слабых поглощениях света (при исходно малой амплитуде оптоакустического сигнала). Это хорошо видно на рис.5.14в - зона $z = 2\mu_a^{-1}$ изображена на той же плоскости и глубина зондирования l_m при $\mu_a = 32 \text{ см}^{-1}$ несколько меньше этой величины.

Результаты реконструкции распределения поглощения света в микрооднородных средах представлены на рис.5.15.

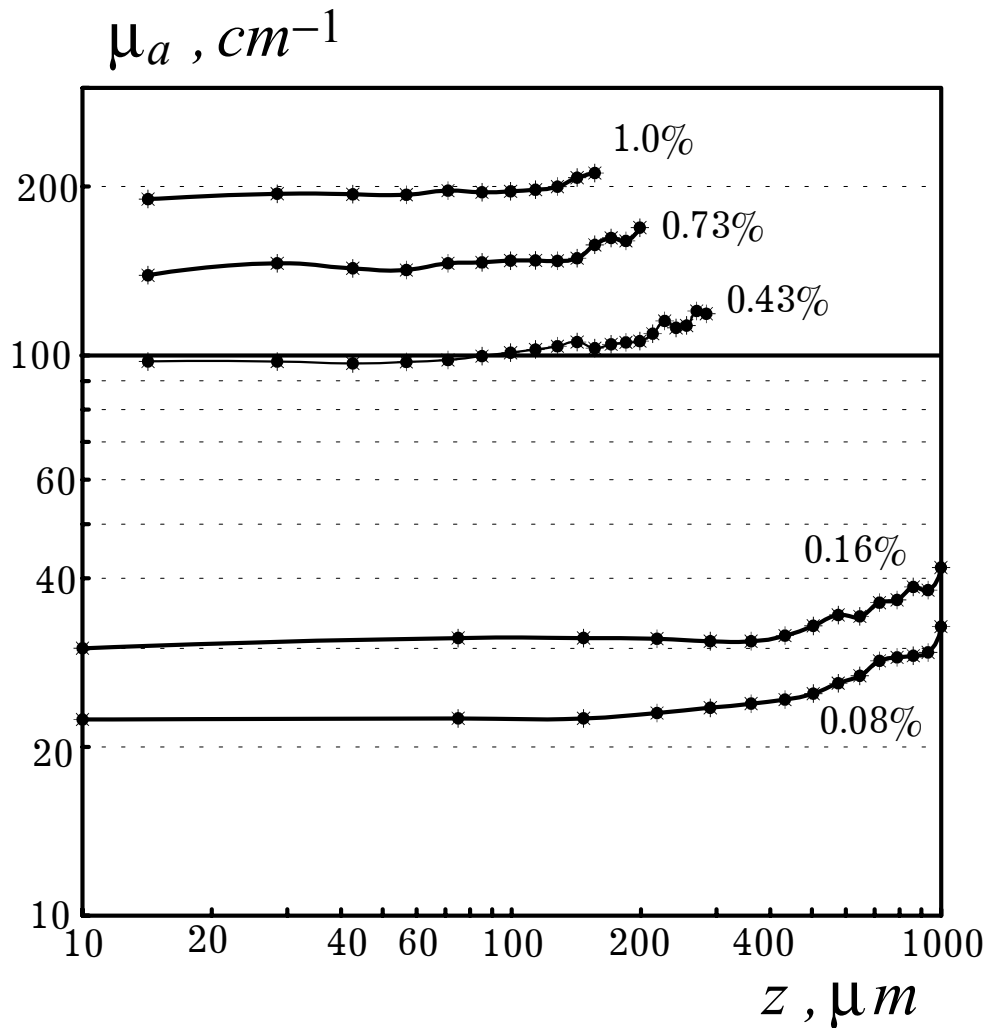


Рис.5.15. Распределение поглощения в магнитной жидкости различной концентрации.

Исследовались магнитные жидкости на основе магнетита, диспергированного в трансформаторном масле; средний размер частиц магнетита $2R_p = 200 \text{ \AA}$; его объемная концентрация изменялась в пределах $n = 0.08\% - 1\%$. Расстояние между поглощающими частицами имеет порядок $d \sim R_p (4\pi/3n)^{1/3}$ ($\sim 0.1 - 0.2 \text{ мкм}$) и условие (5.1) микрооднородности среды выполняется. В этом случае может быть исследована только неоднородность распределения концентрации частиц по объему (в первом приближении коэффициент

поглощения света пропорционален концентрации частиц).

Полученные результаты (см.рис.5.15) показывают, что поглощение света в магнитной жидкости увеличивается от поверхности в глубину. Относительные изменения коэффициента поглощения значительны (до 50% при $n=0.08\%$) при низких концентрациях магнетита и снижаются с ростом концентрации. При высоких концентрациях ($n > 1\%$) изменение поглощения с глубиной практически отсутствует.

Коэффициент поглощения света у поверхности практически линейно возрастает с увеличением концентрации (см. рис.5.16), а толщина поверхностного слоя - убывает.

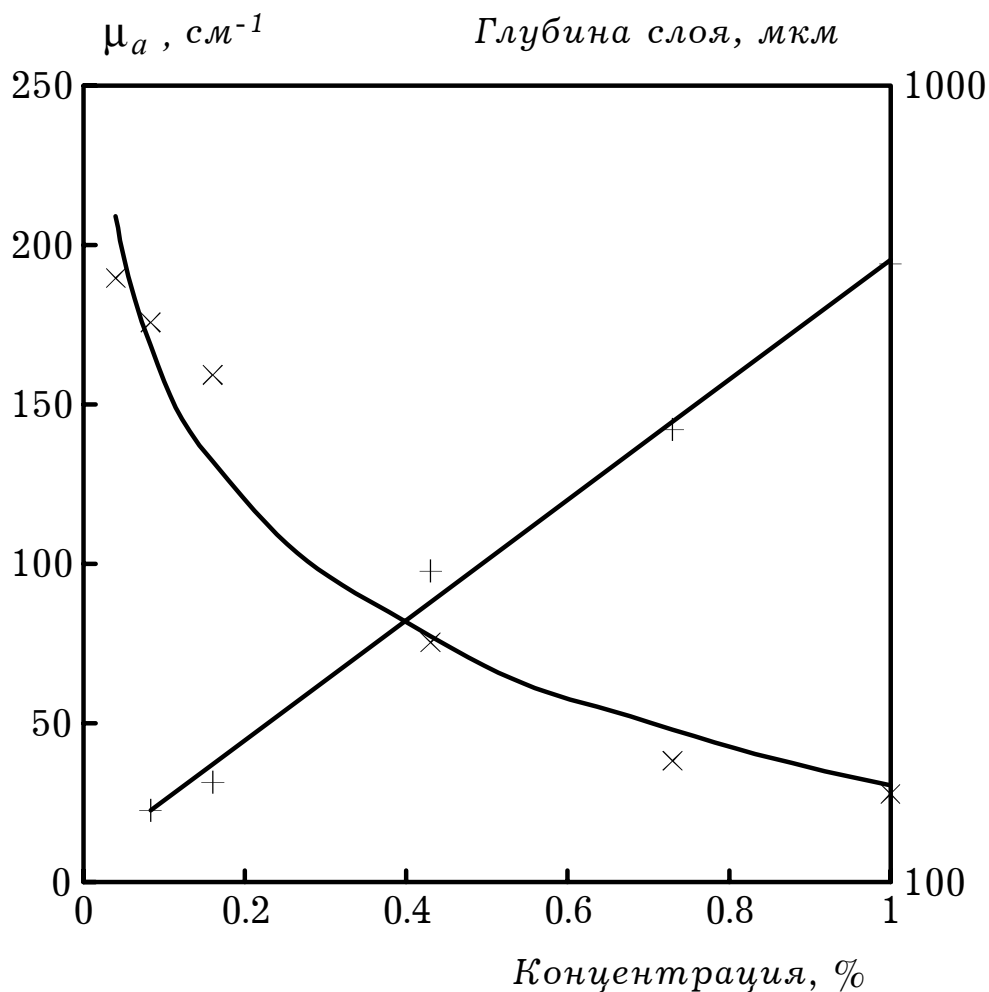


Рис.5.16. Зависимость коэффициента поглощения света (+) и

глубины поверхностного слоя (\times) магнитной жидкости от концентрации магнетита.

Поэтому можно считать оправданным приближение однократного рассеяния и связать коэффициент поглощения света с концентрацией:

$$\mu_a = \frac{3\sigma_0}{4\pi R_p^3} n,$$

(σ_0 – сечение поглощения света отдельной частицей). В нашем случае сечение поглощения составляет малую долю поперечного сечения частицы:

$$\frac{\sigma_0}{\pi R_p^2} = 0.03,$$

что разумно для частиц, много меньших длины волны^[114].

Уменьшение концентрации частиц у поверхности может быть связано с избыточной обменной энергией магнитного взаимодействия диполей. Похожие эффекты отмечались у магнитных жидкостей^[115], однако прямые измерения распределения концентрации частиц по глубине до сих пор отсутствовали.

Таким образом, оптоакустическая томография позволяет исследовать распределение поглощения света в микрооднородных средах в диапазоне значений от единиц до сотен см^{-1} . Глубина зондирования зависит от динамического диапазона системы регистрации акустического сигнала и составляет $l_m = (2.5 \div 3) \mu_a^{-1}$. Разрешающая способность определяется временным разрешением системы регистрации акустического сигнала и может составлять единицы микрон.

Таким образом, оптоакустическая томография с временным разрешением является мощным методом исследования поглощения света в неоднородных средах. При этом ее техническая реализация возможна на основе достаточно широко распространенных лазерных источников и электронных устройств, которые имеются во многих лабораториях.

Развитая теория оптоакустической томографии с временным разрешением позволяет с помощью прямых математических процедур восстанавливать распределение коэффициента поглощения света в прозрачных, поглощающих и рассеивающих свет средах. Исследованные экспериментальные методики имеют пространственное разрешение на уровне 10-15 мкм при глубине зондирования до нескольких миллиметров. Величина коэффициента поглощения света может лежать в диапазоне от единиц до сотен обратных сантиметров. Глубина зондирования определяется глубиной проникновения света в среду. Проблема достижения высокого разрешения в поперечном направлении пока остается открытой. В то же время, пути ее решения достаточно ясны и не сулят качественного усложнения процедуры обработки сигнала.

Измерения поглощения света с помощью оптоакустической томографии оперативны и позволяют работать в реальном масштабе времени. Поэтому эта методика может быть использована в различных технологических процессах, а также медицинской диагностике.