

Оптическое просветление бумаги в оптической когерентной томографии: моделирование методом Монте-Карло

М.Ю.Кириллин, А.В.Приезжев, Ю.Хаст, Р.Мюллыля

Методом Монте-Карло рассчитаны сигналы оптического когерентного томографа от образцов бумаги до и после воздействия на них различных иммерсионных жидкостей: этанола, глицерина, бензилового спирта и 1-пентанола. В рамках использованной модели показано, что все рассмотренные жидкости снижают контрастность изображения неоднородностей в верхних слоях образцов, однако значительно улучшают видимость нижних слоев и позволяют локализовать заднюю границу зондируемой среды, что важно при прецизионном бесконтактном измерении толщины бумажного листа, например в процессе производства. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, длина когерентности, светорассеяние, моделирование методом Монте-Карло, оптическое просветление бумаги, бесконтактные измерения.

1. Введение

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является одним из наиболее перспективных методов неинвазивного исследования внутренней структуры оптически неоднородных объектов. Это позволяет сделать предположение о возможности его применения в бумажной промышленности для быстрого и высокоточного измерения свойств бумаги в процессе ее производства. Используемые в настоящее время методы, такие, например, как электронная микроскопия и лазерная конфокальная микроскопия, требуют длительного анализа полученных данных и дополнительной обработки исследуемого образца, а также могут существенно изменять его свойства. В связи с этим использование при исследовании бумаги новых лазерных и оптических методов, развивающихся в настоящее время, представляется весьма перспективным [1].

Метод ОКТ, впервые предложенный в 1991 г. [2], потенциально может быть использован для контроля качества бумаги благодаря высокому разрешению, скорости сканирования и отсутствию необходимости в долгой предварительной обработке образца. Основой томогра-

фа является интерферометр Майкельсона, в объектное плечо которого помещается исследуемый образец, а в опорное – зеркало, движущееся с постоянной скоростью. Интерференция световых волн, приходящих на фотодетектор из опорного и объектного плеч, формирует выходной сигнал в виде суперпозиции наборов интерференционных полос. Каждый такой набор представляет собой парциальный интерференционный сигнал, образующийся при суперпозиции излучения, пришедшего из опорного плеча, и излучения, отраженного единичным объектом (границей раздела или частицей). Огибающая этого сигнала определяется функцией когерентности источника, а амплитуда зависит от разности показателей преломления на границе отражения и от ослабления в среде.

Таким образом, чем меньше длина когерентности, тем выше продольное (в направлении зондирования) разрешение ОКТ-системы. Обычно ее разрешение с суперлюминесцентным диодом (СЛД) в качестве источника излучения составляет ~ 10 мкм. С помощью ОКТ можно получить высококачественные изображения внутренней структуры объектов, слабо рассеивающих в оптическом и ближнем ИК диапазонах. Наличие внутри исследуемого объекта сильно рассеивающих областей вызывает искажения в сигнале томографа, что может привести к получению неверной информации об объекте.

Для уменьшения кратности рассеяния при использовании ОКТ обычно применяют просветляющие жидкости (ПЖ). Эффект просветления состоит в том, что жидкость с показателем преломления, близким к показателю преломления компонент сильно рассеивающей области, замещает в исследуемом объекте вещество с сильно отличающимся показателем преломления, что ведет к изменению рассеивающих свойств области [3].

Рассеяние и отражение света происходит на границе сред с разными показателями преломления. Преломление на такой границе описывается законом Снеллиуса, а отражение определяется коэффициентами Френеля. Рассеиватель в среде представляет собой область, показав-

М.Ю.Кириллин. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; University of Oulu, Faculty of Technology, Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory, P.O. Box 4500, 90014 University of Oulu, Oulu, Finland;
e-mail: mkirillin@yandex.ru, kirillin@ee.oulu.fi

А.В.Приезжев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: avp2@mail.ru

J.Hast, R.Myllylä. University of Oulu, Faculty of Technology, Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory, P.O. Box 4500, 90014 University of Oulu, Oulu, Finland;
e-mail: jukka.hast@ee.oulu.fi, risto.myllyla@ee.oulu.fi

Поступила в редакцию 3 ноября 2005 г., после доработки – 10 января 2006 г.

тель преломления которой отличается от показателя преломления окружающей среды. Если показатели преломления достаточно близки, а размер рассеивателя довольно велик ($n_1/n_2 < 1.05$, $R \gg \lambda$, оптически мягкие частицы), то анизотропия рассеяния довольно высока и направление движения фотона при рассеянии изменяется незначительно. В обратном случае эффект рассеяния довольно велик, что приводит к значительным изменениям в направлении движения и к быстрой хаотизации направления движения фотона, а следовательно, к искажениям в ОКТ-сигнале. Чтобы избежать этих искажений, разность показателей преломления внешней среды (для бумаги это воздух) и рассеивателей уменьшается путем введения во внешнюю среду ПЖ, что делает рассеиватели оптически еще более мягкими.

Типичная структура образца бумаги представлена на рис.1. Бумага состоит из древесных волокон, между которыми находится воздух. Из-за требований, предъявляемых к свойствам бумаги, в процессе производства в бумажную пульпу (исходный материал) добавляют наполнители различных размеров, которые также могут присутствовать в образце бумаги. Толщина древесных волокон обычно составляет 5–20 мкм, в то время как длина может достигать нескольких миллиметров. В процессе производства эти волокна спрессовываются в слой. Типичная толщина бумаги равна толщине семи-восьми волокон.

Одной из актуальных задач бумажной промышленности является бесконтактное высокоточное измерение толщины бумаги. Метод ОКТ может быть использован для решения этой задачи, однако из-за сильного светорассеяния в бумаге необходимо применение ПЖ. В частности, для измерения толщины бумаги требуется визуализация задней границы образца, что может быть реализовано с помощью просветляющей жидкости. Потенциальная ПЖ для образца бумаги должна обладать следующими свойствами: 1) ее показатель преломления должен быть близок к показателю преломления древесных волокон и наполнителей; 2) она не должна проникать в древесные волокна, а только заполнять воздушные полости внутри образца и 3) она не должна вступать в химическую реакцию с волокнами и наполнителями.

В данной работе мы рассматриваем многослойную модель бумаги, имитирующую ее внутреннюю структуру. Следует отметить, что для упрощения расчета исследуются не отдельные волокна, а их непрерывные слои, рассеяние в которых характеризуется известными из литературы оптическими параметрами. Для упрощения

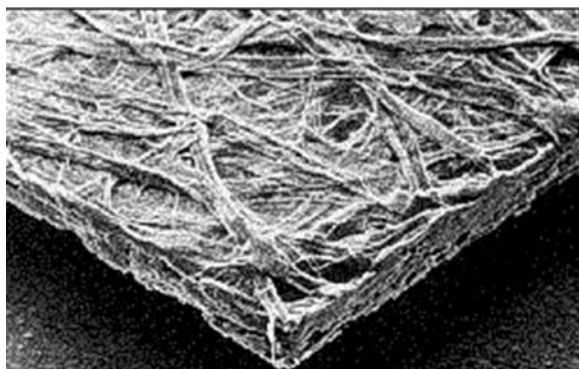


Рис.1. Микрофотография листа бумаги, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа (толщина образца ~ 100 мкм).

модели мы предполагаем, что образец состоит из плоских или неплоских чередующихся слоев с такими же оптическими свойствами, как у древесных волокон и воздуха. Воздушные слои могут содержать также частицы, соответствующие по свойствам частицам, используемым в производстве в качестве наполнителей бумаги. В зависимости от пористости (содержания воздуха) моделируемого образца толщины слоев волокна варьировались от 5 до 18 мкм. В качестве базовой модели в расчетах использовалась девятислойная модель, состоящая из пяти слоев волокон и четырех слоев воздуха (общая толщина 100 мкм). Один из вариантов данной модели рассматривался в нашей предыдущей работе [4].

Исходя из указанных выше требований, мы выбрали несколько ПЖ, широко применяющихся для оптического просветления различных объектов, в том числе биотканей [5–7]. Это жидкости с различными показателями преломления, поскольку оптическое просветление ткани может служить для двух целей – визуализации внутренней структуры образца (границ слоев в нашей модели) и высокоточного измерения толщины образца. Исходя из значений показателя преломления для древесных волокон и наполнителей, а также из требований, приведенных выше, мы выбрали следующие просветляющие жидкости (в скобках указан показатель преломления): этанол (1.36), 1-пентанол (1.41), глицерин (1.47) и бензиловый спирт (1.54).

При моделировании предполагалось, что жидкости не проникают внутрь слоев волокон, но полностью заполняют все воздушные полости между ними. Кроме того, оптическое просветление образцов бумаги этими ПЖ изучалось экспериментально в [8]. Хотя в этой работе и было показано, что некоторые из жидкостей неудобны в применении из-за быстрого испарения или долгого проникновения внутрь образца, для общности модельных экспериментов мы рассматриваем их все, поскольку основной нашей задачей является анализ влияния уменьшения разности показателей преломления на рассеивающие свойства бумаги. Цель данной работы состоит в определении эффективности применения перечисленных выше ПЖ при оптическом просветлении бумаги для получения ее ОКТ-изображений.

2. Моделирование ОКТ-сигнала методом Монте-Карло

Метод Монте-Карло основан на расчете большого числа случайных траекторий фотонов в рассеивающей среде, от оптических свойств которой зависят длины и формы индивидуальных траекторий, и на последующей статистической обработке полученных результатов. Основными входными параметрами при моделировании являются коэффициенты рассеяния и поглощения μ_s и μ_a , фактор анизотропии g и показатель преломления n .

Расчет модельного сигнала томографа происходит на основе распределения фотонов, дающих вклад в сигнал, по длинам их пробега в среде [9–12]. Далее интерференционный сигнал рассчитывается в соответствии с формулой

$$I(t) = \sum_{\Delta l} [I_r I_s(t, \Delta l)]^{1/2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta l\right) \exp\left[-\left(\frac{\Delta l}{l_{\text{coh}}}\right)^2\right], \quad (1)$$

где I_r и I_s – интенсивности излучения, пришедшего из опорного и предметного плеч соответственно; Δl – опти-

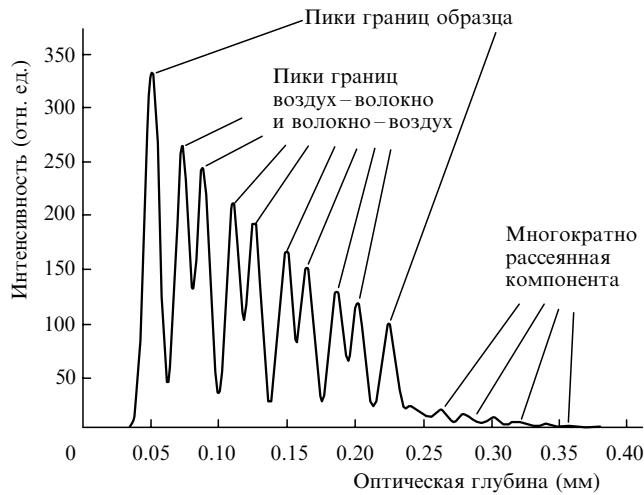


Рис.2. Типичная огибающая ОКТ-сигнала от модельного девяти-слойного образца бумаги.

ческая разность хода; l_{coh} — длина когерентности СЛД. Экспоненциальный множитель в выражении (1) определяет гауссову форму функции когерентности рассматриваемого источника. Длина когерентности выбрана равной 15 мкм, что соответствует параметрам реальной ОКТ-системы [13].

Для увеличения эффективности метода Монте-Карло мы использовали схему так называемого неявного учёта поглощения, которая заключается в том, что вдоль каждого случайного пути распространяется не один фотон, а группа или пакет фотонов, характеризуемые некоторым весом [14]. Данный подход позволяет сравнительно просто учитывать поглощение и переотражение на границах раздела среды и значительно сократить время расчёта при сохранении его точности. Для расчета одного ОКТ-сигнала при сканировании в глубину образца (A -скана) используется 5 млн. фотонных пакетов. При вычислении интерференционного сигнала считается, что каждый фотонный пакет независимо интерферирует с излучением, пришедшим из опорного плеча.

Как уже говорилось выше, ОКТ-сигнал от объекта по сути представляет собой суперпозицию интерференционных картин, определяемых неоднородностями оптических свойств внутри объекта. При его расчете от многослойного образца, моделирующего бумагу, мы получаем набор интерференционных сигналов от границ слоев, поскольку они являются в образце главными отражающими областями. Эти сигналы могут накладываться, если расстояние между отражающими границами раздела не превышает длины когерентности источника.

Типичная огибающая модельного ОКТ-сигнала от «идеализированного» образца бумаги, состоящего из девяти плоских слоев, представлена на рис.2. На сигнале явно различимы пики, обусловленные десятью границами слоев. Пики низкой интенсивности, идущие после десятого пика (соответствует задней границе образца) порождены многократным рассеянием в бумаге.

3. Описание модели

В доступной литературе нам не удалось найти непосредственных значений коэффициентов рассеяния и поглощения для древесных волокон, поэтому для их оценки были взяты значения параметров, полученные авторами

работы [15] с использованием теории Кубелки – Мунка в предположении средней плотности волокон 80 г/м^2 . Таким образом, основываясь также на данных, приведенных в [15–17], мы использовали при моделировании следующие значения: $\mu_s = 16 \text{ мм}^{-1}$, $\mu_a = 0.5 \text{ мм}^{-1}$, $g = 0.94$, $n = 1.53$. Частицы наполнителя моделировались сферическими частицами радиусом от 0.1 до 1.0 мкм с показателем преломления $n = 1.53$ [16], присутствующими в воздушных слоях модельных образцов. Предполагалось, что образцы бумаги имеют многослойную структуру. Чтобы оценить влияние этой характеристики бумаги на эффект просветления, пористость образцов бумаги варьировалась от 20 % до 80 %.

Следует также отметить, что структура и оптические свойства среды исключают возможность аналитического решения задачи распространения излучения в бумаге, т. е. решения основного уравнения теории переноса излучения. Численное решение этого уравнения будет очень времязатратным из-за сложности граничных условий. В то же время упрощенные теории, такие как теория Кубелки – Мунка или диффузионная теория, не учитывают особенности строения бумаги и рассматривают ее как однородную среду, что неприменимо при изучении визуализации внутренней структуры бумаги. Все это делает используемый в настоящей работе метод Монте-Карло наиболее подходящим для решения данной задачи.

В известной авторам литературе отсутствует информация о фазовой функции древесных волокон, однако имеются данные об их факторе анизотропии ($g = 0.94$) [16]. В связи с тем, что изменение направления движения фотона в образце в основном обусловлено его взаимодействием с границами слоя, а не с частицами, и при рассеянии внутри слоя имеет значение только рассеяние вперед, для описания рассеяния в волокнах была выбрана фазовая функция Хензи – Гринштейна, часто применяющаяся при описании анизотропного рассеяния:

$$f_{\text{HG}}(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}. \quad (2)$$

Фазовая функция для сферических частиц наполнителя рассчитывалась по теории Ми. Для каждой рассматриваемой ПЖ фазовые функции для наполнителей рассчитывались отдельно, поскольку они зависят от показателя преломления ПЖ. Параметры установки ОКТ, используемые при моделировании, соответствуют параметрам реальной ОКТ-системы, описанной нами ранее в работе [9], где также проводилось моделирование ОКТ-сигналов методом Монте-Карло.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Образцы бумаги с плоской геометрией слоев

Модельные ОКТ-сигналы от девятислойного образца толщиной 100 мкм были рассчитаны для различных значений пористости в предположении плоской геометрии слоев. Толщина слоя волокон варьировалась от 4 до 16 мкм, что позволяло изменять пористость, в то время как полная толщина образца оставалась постоянной. Добавление просветляющей жидкости в образец моделировалось изменением показателя преломления воздушного слоя на величину показателя преломления, соответствующего данной ПЖ. Типичный набор огибающих ОКТ-сигнала от образца с пористостью 40 % при ис-

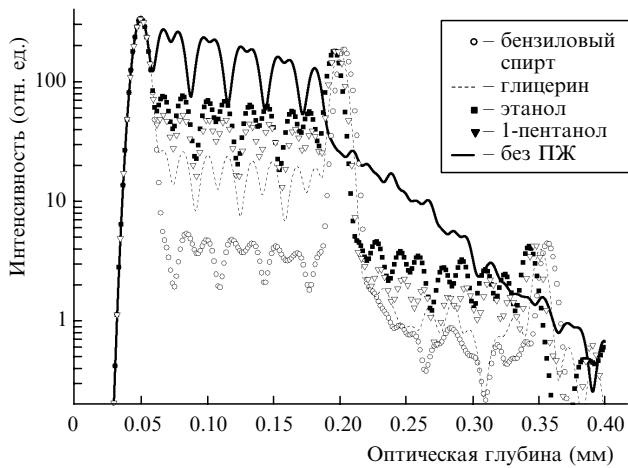


Рис.3. Модельные ОКТ-сигналы от образца бумаги 40 %-ной пористости при использовании различных ПЖ.

пользовании различных ПЖ представлен на рис.3. Каждый пик на этом рисунке соответствует границам воздух – волокно или волокно – воздух. Первый и последний пики соответствуют границам образца, в то время как пики между ними отвечают внутренним границам слоев и несут информацию о внутренней структуре образца. Пики меньшей интенсивности, расположенные за пиком задней границы, формируются фотонами, многократно переотраженными от границ слоев.

Из рис.3 можно видеть, что при добавлении ПЖ величина пика задней границы растет. В то же время величины пиков, соответствующих внутренним границам слоев, уменьшаются с уменьшением разности показателей преломления волокна и ПЖ. Следовательно, для наилучшей визуализации дальней границы необходимо применять ПЖ с показателем преломления, близким к показателю преломления волокон (глицерин или бензиловый спирт). Однако в этом случае визуализация внутренней структуры образца может быть недостаточно хорошей. Использование ПЖ с меньшими показателями преломления обеспечивает лучшую визуализацию внутренних границ слоев. Наличие пиков на затухающем диффузионном «хвосте» (на оптической глубине примерно 0.35 мм) в случае применения ПЖ объясняется переотражением фотонов от внешних границ образца и меньшим рассеянием внутри образца, обусловленным оптическим просветлением.

Визуализация внутренней структуры образца бумаги

при оптическом просветлении с помощью ПЖ сильно зависит от структуры образца. Чем меньше пористость бумаги, тем больше рассеяние в волокнах и тем значительнее вклад многократного рассеяния в сигнал, что приводит к искажениям в получаемых изображениях. Высокая пористость снижает рассеяние в волокнах и делает бумагу более прозрачной, вследствие чего качество ее визуализации с помощью ОКТ повышается. Чтобы количественно охарактеризовать визуализацию внутренней структуры бумаги в данной модели, мы выбрали величину пика четвертой межслойной границы. Следует также отметить, что парциальные сигналы от соседних границ слоев могут перекрываться, если расстояние между границами меньше длины когерентности суперлюминесцентного диода, что выражается в более высоких интенсивностях, чем интенсивность сигнала от единичной границы раздела. Зависимости величин четвертого пика и пика задней границы от пористости бумаги, обусловленные использованием различных ПЖ, представлены на рис.4. В случае 50 %-ной пористости, по сравнению с другими ее значениями, толщины слоев волокон и воздуха примерно одинаковы, что выражается в малом наложении соседних пиков и в снижении интенсивности четвертого пика. Из рис.4 можно видеть, что добавление ПЖ существенно увеличивает величину пика задней границы, однако уменьшает величины пиков внутренних границ слоев, что сказывается на визуализации внутренней структуры образца.

В нашей модели мы не учитывали спекл-модуляцию ОКТ-сигнала, обусловленную интерференцией фотонных пакетов, разность длин траекторий (разность хода) которых в среде не превышает длины когерентности излучения. Наличие интерферирующих фотонных пакетов обусловлено тем, что размеры рассеивателей, равно как и расстояния между ними, сравнимы с длиной когерентности. Учет интерференционных эффектов может привести к уменьшению контрастности внутренних границ на фоне повышения общего уровня сигнала ввиду случайности разности хода фотонных пакетов при их распространении в сильно рассеивающем образце бумаги. Однако вследствие случайного характера структуры бумаги ярко выраженные границы слоев в ней отсутствуют, что ведет к слабому проявлению этих эффектов в реальных ОКТ-изображениях образцов бумаги [8].

В современном производстве бумаги различные наполнители используются для улучшения таких ее качеств, как белизна и прочность. При моделировании мы

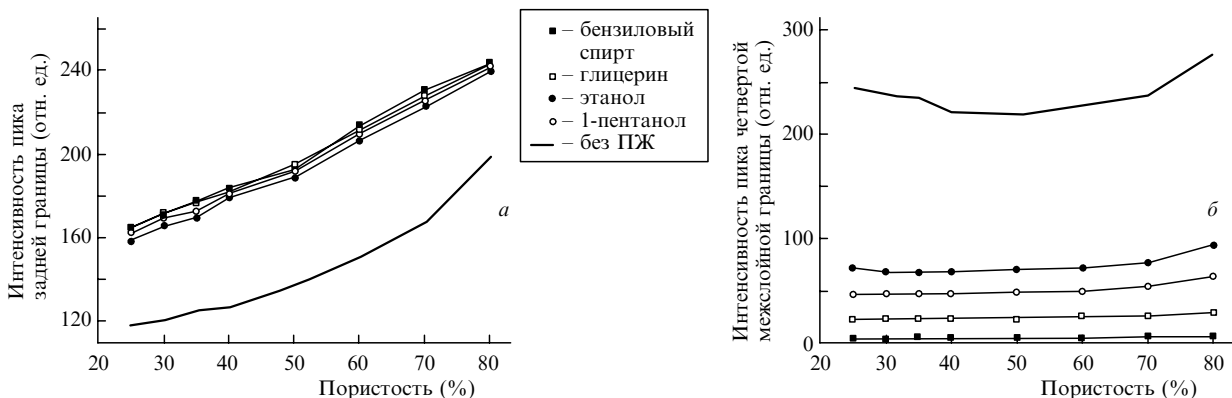


Рис.4. Зависимости от пористости образца бумаги интенсивностей пиков задней границы (а) и четвертой межслойной границы (б) при использовании различных ПЖ.

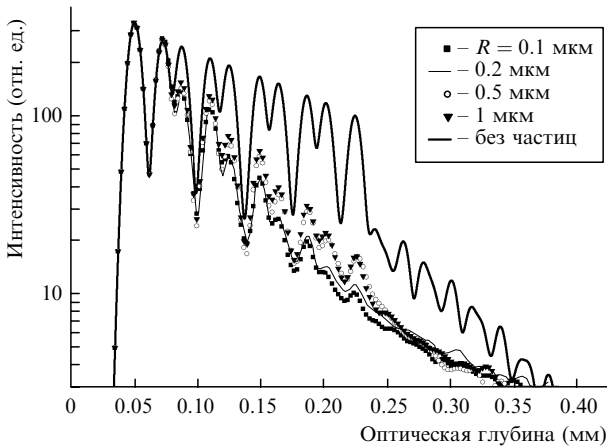


Рис.5. Огибающие модельных ОКТ-сигналов от образца бумаги с плоскими слоями, содержащего частицы наполнителя различных радиусов.

предполагаем, что частицы наполнителя имеют сферическую форму, а их радиус варьируется от 0.1 до 1 мкм. Коэффициент рассеяния в слое, содержащем частицы наполнителя, выбран равным 100 мм^{-1} исходя из предположения, что концентрация наполнителей довольно высока, и при пролете через слой вероятность рассеяться на частице носителя для фотона значительна. Мы рассматриваем образцы с пористостью 44 %, считая, что толщины всех слоев равны. Также предполагается, что частицы наполнителя содержатся только в воздушных слоях.

Огибающие ОКТ-сигналов от образцов, содержащих частицы различных размеров, представлены на рис.5. Видно, что присутствие наполнителя понижает величины пиков границ слоев благодаря дополнительному рассеянию. Чем меньше частицы, тем более изотропно они рассеивают. Многократное рассеяние также дает вклад в сигнал, что выражается в присутствии сигнала после пика задней границы слоя. Ярко выраженные пики в этой части сигнала говорят о том, что он сформирован фотонами, многократно переотразившимися от границ слоев, в то время как отсутствие таких пиков свидетельствует о формировании сигнала фотонами, рассеявшимися на частицах. Из полученных результатов можно видеть, что контрастность ОКТ-изображения задней границы образца увеличивается с увеличением радиуса частиц наполнителя. Это объясняется тем, что в данном случае растет анизотропия рассеяния частицы и среда становится более прозрачной.

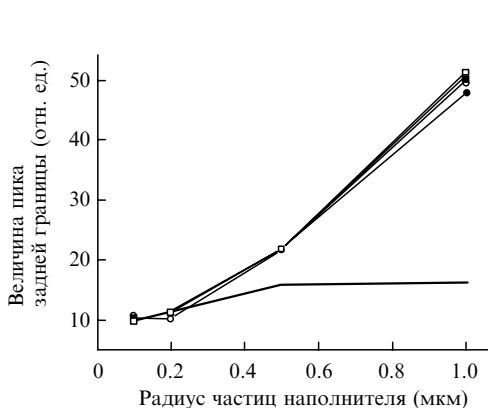


Рис.6. Зависимости величин пиков задней границы и четвертой межслойной границы от радиуса частиц наполнения при использовании различных ПЖ.

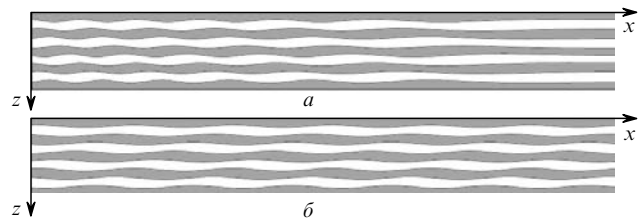


Рис.7. Сечения моделируемых образцов бумаги с переменной (а) и постоянной (б) пространственными частотами модуляции границ слоев. Размер каждого изображения: 1.00 мм по оси x и 0.10 мм по оси z.

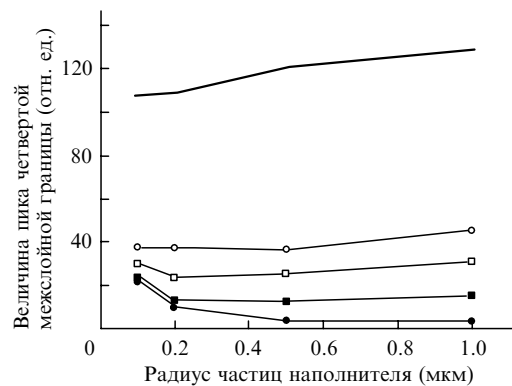
На рис.6 представлены зависимости величин пиков в модельном ОКТ-сигнале от радиуса частиц наполнителя. Хотя абсолютная величина пика может уменьшаться с возрастанием радиуса частиц из-за снижения вклада многократного рассеяния, наилучшая локализация границ слоев имеет место в случае частиц больших радиусов.

4.2. Образцы бумаги с неплоской геометрией слоев

Поскольку в реальности слои, из которых состоит бумага, далеко не плоскопараллельны, рассмотренную выше модель можно считать довольно грубой, позволяющей лишь качественно оценить эффект использования просветляющей жидкости при построении ОКТ-изображений бумаги. Как видно из рис. 1, бумага состоит из слоев волокон с границами неплоской формы. Чтобы приблизить нашу модель к реальности и изучить эффект кривизны границы, мы промоделировали двумерные изображения образцов бумаги для различных форм границ слоев. Для аналитического описания были выбраны слои с границами синусоидальной формы. Сначала мы промоделировали ОКТ-сигналы от образцов для границ с меняющейся пространственной частотой, чтобы оценить влияние пространственной частоты на просветление. Форма поверхности описывалась следующим выражением:

$$z(x) = a \sin \left(2\pi\nu x^2 + \frac{4\pi m}{10} \right), \quad (3)$$

где $a = 2 \text{ мкм}$ – амплитуда; $\nu = 6 \text{ мм}^{-1}$ – пространственная частота модуляции межслойной границы; $m = 1 - 8$ – номер межслойной границы. Сечение моделируемого образца бумаги представлено на рис.7,а. Модельные сканы образцов бумаги с такой геометрией с применением и без применения ПЖ представлены на рис.8. Каждое изображение состоит из 100 последовательных А-сканов, сде-



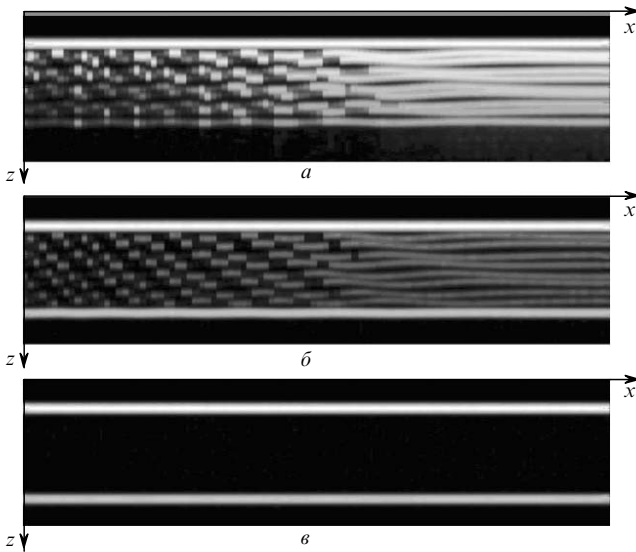


Рис.8. Модельные ОКТ-изображения образцов бумаги (рис.7,а) без ПЖ (а) и с использованием этанола (б) и бензилового спирта (в). Размер области сканирования: 1.00 мм по оси x и 0.25 мм по оси z.

ланных с интервалом в 10 мкм в поперечном направлении. Из рис.8 можно видеть, что с увеличением пространственной частоты модуляции границ слоев контрастность ОКТ-изображения задней границы образца без применения просветляющей жидкости уменьшается. Это происходит из-за того, что при малой пространственной частоте модуляции фотоны отражаются практически строго назад, давая вклад в малократное рассеяние. С повышением пространственной частоты модуляции границы при той же амплитуде фотоны, отражаясь, отклоняются от направления строго назад, особенно на участках, не перпендикулярных исходному направлению их движения, и дают вклад в многократное рассеяние или вообще не дают вклада в ОКТ-сигнал, что ухудшает контрастность ОКТ-изображения задней границы образца. Однако участки, перпендикулярные исходному направлению движения, отражают строго назад. На рис.8 они представляют собой интервалы с высокой интенсивностью на фоне низкого сигнала. Улучшение визуализации остальных элементов границы может быть достигнуто увеличением численной апертуры приемника.

Полученные модельные изображения показывают, что применение просветляющих жидкостей существенно повышает контрастность ОКТ-изображения задней границы образца бумаги, хотя и снижает качество визуализации его внутренней структуры (межслойных границ). Этот эффект особенно заметен в областях с высокой пространственной частотой межслойных границ. Для дальнейшего исследования и численной оценки просветляющего эффекта мы рассматриваем образцы с $\nu = 6 \text{ мм}^{-1}$. Эти поверхности могут быть описаны следующим выражением:

$$z(x) = a \sin \left(2\pi\nu x + \frac{4\pi m}{10} \right). \quad (4)$$

Чтобы учесть в модели микродефекты волокон, мы добавили в выражение (4) небольшую случайную компоненту. Таким образом, выражение для границ приобрело следующий вид:

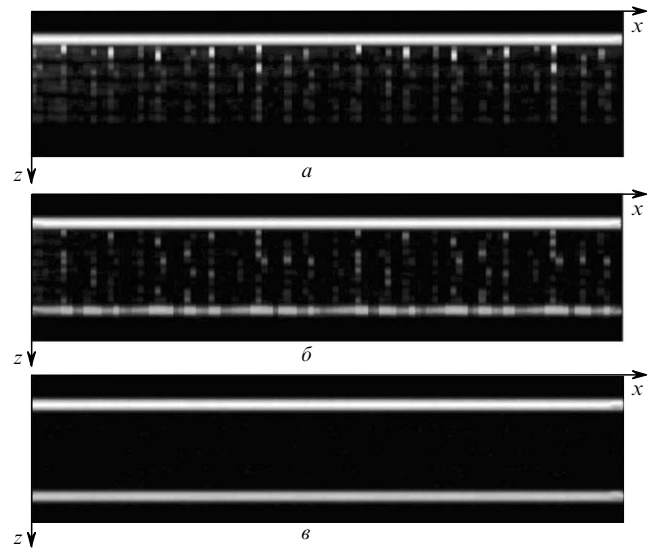


Рис.9. Модельные ОКТ-изображения образцов бумаги (рис.7,б) без ПЖ (а) и с использованием этанола (б) и бензилового спирта (в). Размер области сканирования: 1.00 мм по оси x и 0.25 мм по оси z.

$$z(x) = a \sin \left(2\pi\nu x + \frac{4\pi m}{10} \right) + \frac{a}{5} \sin(2\pi\nu x + \text{random}), \quad (5)$$

где $m = 1 - 8$ – номер межслойной границы; random – случайная величина, равномерно распределенная в интервале $[0, 2\pi]$. Сечение такого образца бумаги представлено на рис.7,б. Полученные модельные ОКТ-изображения этого образца показаны на рис.9. Видно, что в отсутствие просветляющей жидкости контрастность ОКТ-изображения задней границы очень мала (рис.9,а), однако, как и в предыдущем случае, она увеличивается при использовании ПЖ (рис.9,б, в).

Чтобы количественно оценить влияние просветляющих жидкостей на контрастность ОКТ-изображения задней границы образца, мы усредняли A-скан по 100 реализациям в каждом модельном изображении и сравнивали величины пиков задней границы в усредненном скане. При этом рассматривались две модели образцов с межслойными границами, определяемыми выражениями (4) и (5).

Результаты сравнения представлены на рис.10. Мож-

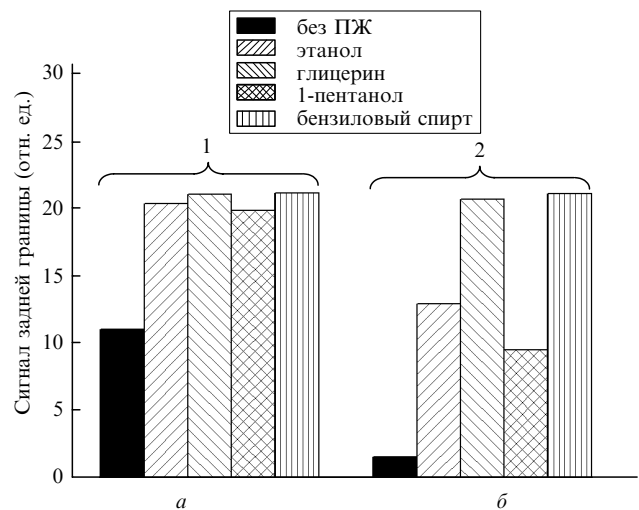


Рис.10. Контрастность ОКТ-изображения задней границы образца без использования (а) и с использованием (б) ПЖ для межслойных границ без случайной компоненты (1) при ее наличии (2).

но видеть, что для модели образца бумаги с межслойными границами, определяемыми выражением (4), эффект от использования всех ПЖ практически одинаков: контрастность ОКТ-изображения задней границы по сравнению с сухим образцом улучшается в два раза. Однако следует отметить, что эта модель идеализирована, и модель, определяемая выражением (5), лучше описывает реальную структуру бумаги. Из представленных результатов следует, что в этом случае контрастность ОКТ-изображения задней границы образца без ПЖ с границами, определяемыми по формуле (4), в 7 раз меньше, чем с границами, определяемыми выражением (5), что объясняется сильным рассеянием на микронеровностях, обусловленных случайной компонентой, и соответствующим изменением направления движения фотона.

Из рис. 10 можно также сделать вывод о сильной зависимости степени просветления от конкретной ПЖ в случае границ с микронеровностями. Все рассмотренные просветляющие жидкости обеспечивают значительное улучшение контрастности ОКТ-изображения задней границы в этом случае благодаря уменьшению разности показателей преломления на границе и меньшей хаотизации направления движения фотона. Наилучшая визуализация происходит при использовании глицерина или бензилового спирта, показатели преломления которых наиболее близки к показателю преломления волокон бумаги. При обработке образца этими просветляющими жидкостями контрастность ОКТ-изображения задней границы увеличивается в 10 раз по сравнению с его контрастностью до обработки. Это позволяет сделать вывод о том, что глицерин или бензиловый спирт весьма эффективны при визуализации задней границы образца бумаги, что важно при прецизионном измерении ее толщины. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными работы [8], которые показывают, что бензиловый спирт является наилучшей просветляющей жидкостью при ОКТ-исследовании бумаги.

5. Выводы

Полученные результаты и их анализ говорят о том, что все рассмотренные просветляющие жидкости обеспечивают улучшение визуализации задней границы исследуемого образца, что является важным при прецизионном измерении толщины бумаги с помощью ОКТ, в частности при контроле качества бумаги в процессе производства. Наилучшая визуализация задней границы образца бумаги достигается при использовании ПЖ с показателями преломления, наиболее близкими к показате-

лю преломления древесных волокон (глицерин ($n = 1.47$) и бензиловый спирт ($n = 1.54$)). Однако следует отметить, что в этом случае уменьшается контрастность изображения внутренней структуры образца. Анализ результатов для модели плоских слоев показал, что контрастность ОКТ-изображения задней границы увеличивается с ростом пористости бумаги. Присутствие частиц наполнителя снижает контрастность ОКТ-изображения исследуемых границ слоев, поскольку рассеяние на частицах более изотропно по сравнению с рассеянием на волокнах бумаги. Чем больше размер частиц, тем больше анизотропия и, следовательно, лучше визуализация задней границы.

Рассмотрение межслойных границ неплоской геометрии показало, что контрастность их ОКТ-изображения в отсутствие просветляющих жидкостей гораздо ниже, чем в случае плоской геометрии. Выявлено, что для всех рассмотренных моделей образца наилучшими просветляющими жидкостями являются бензиловый спирт и глицерин, показатели преломления которых наиболее близки к показателю преломления древесных волокон. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами эксперимента, описанного в работе [8].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта «Ведущие научные школы России» № 2071.2003.4., школы ГЕТА (GETA Graduate School) и Инфотек (Infotech Oulu Graduate School).

1. Myllylä R., Alarousu E., Fabritius T., et al. *PALS'03. Book of Abstracts* (Saratov, 2003, p. 26).
2. Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., et al. *Science*, **254**, 1178 (1991).
3. Tuchin V.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**, 2497 (2005).
4. Kirillin M., Priezhev A.V., Alarousu E., et al. *PALS'03. Book of Abstracts* (Saratov, 2003, p. 39).
5. Меглинский И.В., Башкатов А.Н., Генина Э.А., Чурмаков Д.Ю., Тучин В.Б. *Квантовая электроника*, **32**, 875 (2002).
6. He Y., Wang R.K. *J. Biomed. Opt.*, **9**, 200 (2004).
7. Tuchin V.V. *J. Biomed. Opt.*, **4**, 106 (1999).
8. Фабрициус Т., Алароусу Э., Прикяри Т., Хаст Ю., Мюллера Р. *Квантовая электроника*, **36**, 181 (2006).
9. Yao G., Wang L.V. *Phys. Med. Biol.*, **44**, 2307 (1999).
10. Wang R.K. *Phys. Med. Biol.*, **47**, 2281 (2002).
11. Schmitt J.M., Knuttel A., Yadlowsky M., et al. *Phys. Med. Biol.*, **39**, 1705 (1994).
12. Lindimo T., Smithies D., Chen Z., et al. *Phys. Med. Biol.*, **43**, 3045 (1998).
13. Kirillin M., Priezhev A.V., Kinnunen M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5325**, 164 (2004).
14. Meglinski I.V., Matcher S.J. *Physiol. Meas.*, **23**, 741 (2002).
15. Borch J., et al. *Handbook of Physical Testing of Paper* (New York: Marcel Dekker, 2002, Vol. 2).
16. Green K., Lamberg L., Lumme K. *Appl. Opt.*, **39**, 4669 (2000).
17. Carlsson J., Hellentin P., et al. *Appl. Opt.*, **34**, 1528 (1995).