

# Обзор новых методов оптической когерентной томографии их возможностей и перспектив практического использования. Сравнение с традиционными методами оптической томографии.

И.А.Андропова  
ИПФ РАН, Нижний Новгород  
E mail [andr@ufp.appl.sci-nnov.ru](mailto:andr@ufp.appl.sci-nnov.ru)

## Аннотация

Проведено рассмотрение новых методов оптической когерентной томографии (ОКТ), их особенностей, возможностей, и перспектив по сравнению с традиционными методами ОКТ. Рассмотрен метод квантовой оптической томографии, (Q-ОСТ), в котором источником излучения служит квантовый свет перепутанных фотонов. Рассмотрен также аналог Q\_ОСТ на классическом свете с использованием chirпованных лазерных импульсов. Новизна рассматриваемых методов состоит в использовании новых источников излучения, интерференционных схем и новых методов получения информации о структуре исследуемого объекта, которые исключают влияние дисперсии материала на продольное разрешение структуры объекта.

## Текст статьи

Цель данной заметки рассмотреть новые методы оптической когерентной томографии, опубликованных за последние несколько лет, их особенностей, возможностей, и перспектив их практического применения по сравнению с традиционными методами ОКТ. Новизна рассматриваемых методов состоит в использовании новых источников излучения, интерференционных схем и новых методов получения информации о структуре исследуемого объекта, которые исключают влияние дисперсии материала на продольное разрешение структуры объекта.

Прежде чем переходить к описанию новых методов ОКТ определим понятие «традиционные методы» ОКТ. Кроме того, коротко перечислим направления развития традиционных методов их задачи и проблемы.

Оптическая когерентная томография (ОКТ, в англоязычной аббревиатуре OCT), является одним из быстро развивающихся направлений современной оптики [1,2,3,]. Это связано, главным образом, с тем, что метод ОКТ оказался востребованным в медицине и биологии, т.к. позволяет осуществлять визуализацию под поверхностных структур биотканей с целью определения их патологии, в том числе, онкологической, за счет анализа света, рассеянного от исследуемой области до глубины порядка 1-1,5мм. В настоящее время наиболее востребован этот метод в офтальмологии. Базовой схемой оптической когерентной томографии (ОКТ) является интерферометр Майкельсона, с широкополосным источником излучения, в одном плече которого находится исследуемый рассеивающий объект, в другом, опорном - отражатель, расстояние до которого можно сканировать. При совпадении рассеянного и опорного сигнала на выходе схемы наблюдается сигнал интерференции оптических полей. Анализ этих сигналов в зависимости от положения опорного плеча и лежит в основе **традиционной временной томографии**. Ширину интерферограммы, а, следовательно, и разрешение структуры рассеивающего элемента объекта, определяет длина когерентности источника излучения  $\Delta L$  ( $\Delta L = 0,44 \lambda^2 / \Delta\lambda$ ), которая обратно пропорциональна ширине полосы источника. При ширине источника 100нм. и длине волны 812нм. разрешение -  $\Delta L$  достигает порядка 3 мкм. Наибольшее известное нам продольное разрешение получено в работе [4] с использованием составного источника на 20 длинах волн составляет 0,7мкм

Бурное развитие метода ОКТ, впервые опубликованного в литературе в начале 90 годов, подтверждается, большим числом (не менее 500) ежегодных публикаций по этой тематике. К настоящему времени, наряду с временной томографией, появилось два вида

спектральной томографии, в том числе, спектральной томографии, в которой сканирование длины опорного плеча заменяется математической обработкой спектральных компонент полного интерференционного сигнала со всего исследуемого объема массивом независимых фотоприемников. Кроме того, получили развитие методы томографии на основе цифровой голографии и методы оптической когерентной микроскопии для увеличения поперечного разрешения, в которой используется максимально сфокусированное излучение и сканирование фокального пятна по глубине образца и в поперечных направлениях. Наряду с механическим сканированием фокального пятна исследуются методы сканирования пятна по глубине за счет мат обработки параметров интерференционного сигнала, рассеянного со всего объема при неподвижном положении фокуса.

Задачи, которые стоят перед ОКТ, в основном диктуются необходимостью улучшить качество диагностики патологии биотканей для постановки правильного диагноза. Эти задачи сводятся к увеличению глубины наблюдения, разрешения, в том числе за счет увеличения полосы источника излучения, уменьшения влияния дисперсии образца, и увеличения быстродействия, чтобы проводить исследования на живых объектах в реальном масштабе времени. Учитывая массовые применения ОКТ исследований, приборы должны быть, надежными, компактными, и удобными в обращении. и не дорогими.

Поиски увеличения разрешения и исключения влияния дисперсии материала на качество томограммы привели к поискам новых методов получения структуры подповерхностных слоев исследуемых биотканей. К настоящему времени в литературе обсуждаются два метода: Метод квантовой томографии с использованием квантового света – метод Q OCT и его классический аналог, с использование импульсного лазера с chirпованными импульсами – метод CF - OCT

#### **Метод квантовой томографии**

Первым в ряду новых методов ОКТ был рассмотрен метод, в котором в качестве источника света был предложен квантовый свет перепутанных фотонов [5 - 9]. Для получения неклассического широкополосного света перепутанных фотонов, было предложено использование процесс даун конверсии или параметрического рассеяния света, которое возникает, когда на двупреломляющий нелинейный кристалл подается монохроматическая накачка. Малая часть поля накачки преобразуется в форме конуса в длинноволновое широкополосное излучение, содержащее пары перепутанных (сцепленных) фотонов. Фотоны из пары получили название сигнального и холостого. Эти фотоны могут быть селектированы из этого конуса за счет размещения двух диафрагм вокруг фазо согласованных направлениях  $k_1$  и  $k_2$ , определяемых соотношениями  $k_0 = k_1 + k_2$ , где  $k_j = \omega_j / cn_j$ , где  $\omega_{0,1,2}$  угловые частоты накачки и конвертируемых фотонов,  $c$  – скорость света, а  $n_j$  показатель преломления на частоте  $\omega_j$ . Закон сохранения энергии для фотонов накачки с частотой  $\omega_0$  и фотонов, возникших в результате даун конверсии с частотами -  $\omega_1, \omega_2$  имеет вид  $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ . Эти фотоны обладают рядом контр интуитивных нелокальных свойств [8,9]:

- 1) Два фотона на выходе даун конвертера описываются единой волновой функцией, которая не может быть представима произведением волновых функций каждого фотона, в связи с чем они получили название перепутанных (entangled) в частотной области.
- 2) Фотоны попарно, удовлетворяют закону сохранения энергии и этим отличается от обычных широкополосных источников, что приводит к антикорреляции спектральных компонент двух перепутанных фотонов,
- 3) В сигнале интерференции 4-ого порядка (в сигнале совпадений) перепутанных фотонов происходит компенсация дисперсии, даже, если материал с дисперсией находится на пути только одного фотона. [10]

Это последнее свойство навело исследователей на мысль о возможности решить проблему дисперсии в методах ОКТ с использованием перепутанных фотонов в качестве источника излучения.

В основе предложенного для ОКТ метода использования перепутанных фотонов лежит поведение перепутанных фотонов при регистрации их интерференции на двух выходах

светоделителя двумя фотоприемниками с использованием схемы совпадений. При регистрации зависимости сигнала совпадений от задержки между сигнальными и холостыми фотонами наблюдается четкий провал в сигнале совпадений при нулевой разности задержек. Такое поведение сигнала совпадений спутанных фотонов в 2002 году в работе [11] было впервые рассмотрено как основа нового метода квантовой оптической томографии (Q\_ОСТ).

Теоретическое рассмотрение метода проводилось с использованием интерференционной схемы (Рис.1 а), впервые предложенной для исследования ширины полосы перепутанных фотонов в работе трех авторов (Hoong, Ou and Mande 1987) [12] Эта схема получила название НОМ интерферометра. В основе этой схемы лежит симметричный светоделитель на вход которого с одной стороны по пути, где предусмотрено изменение задержки (длины), поступают холостые фотоны, с другой, рассеянные от объекта исследований, сигнальные фотоны из перепутанной пары. На двух выходах делительной пластинки размещаются 2 фотоприемника, сигнал с которых регистрируется схемой совпадений.

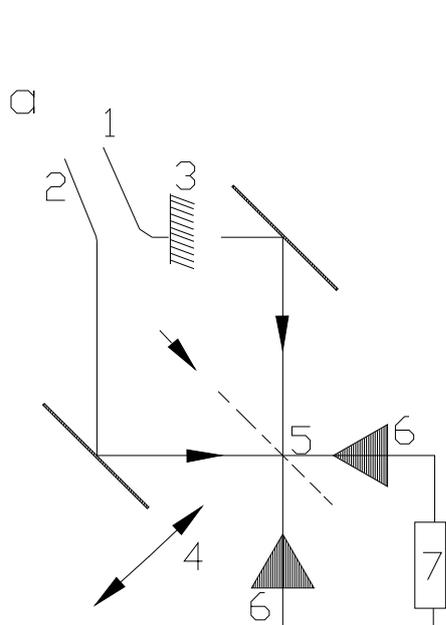


Рис.1а.

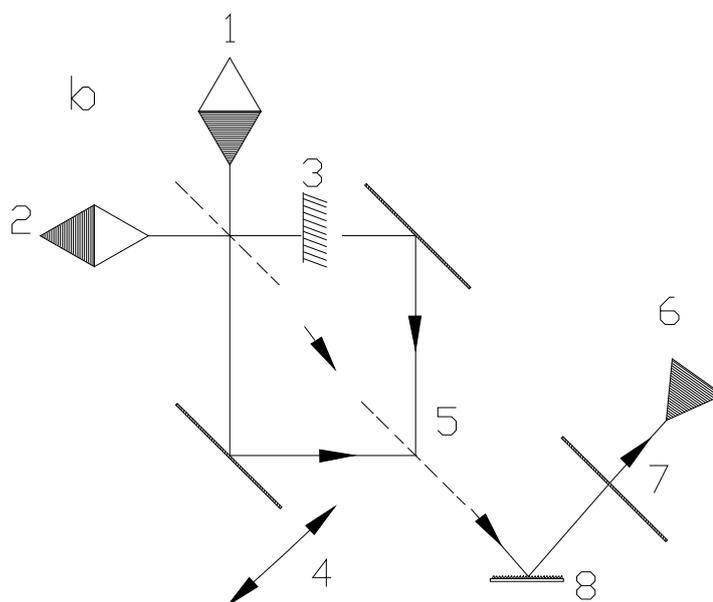


Рис1.б

Интерференция рассеянного и опорного сигнала фиксируется по провалу в сигнале совпадений. Таким образом, в отличие от традиционной схемы ОКТ, где регистрируется сигнал интерференции оптических полей в схеме квантовой когерентной томографии (Q-ОКТ) регистрируется сигнал совпадений с двух фотоприемников, т.е функция корреляции интенсивностей полей  $C(\tau)$ , которая имеет вид:

$$C(\tau) = \Lambda_0 - \text{Re}(\Lambda(\tau)) \quad (1)$$

$$\text{где } \Lambda_0 = \int d\Omega |H(\omega_0 + \Omega)|^2 S(\Omega) \quad (1')$$

$$\Lambda(\tau) = \int d\Omega H(\omega_0 + \Omega) H^*(\omega_0 - \Omega) S(\Omega) e^{-i\Omega\tau} \quad (1'')$$

где  $S(\Omega)$  – спектральное распределение волнового пакета спутанных фотонов,  $H(\omega)$  функция рассеяния от всех структур объекта. Член взаимной интерференции в (1'') связан с функцией рассеяния от объекта квадратично. Это значит, что рассеяние происходит одновременно на двух частотах,  $\omega_0 + \Omega$  и  $\omega_0 - \Omega$  в форме произведения, что связано с перепутанной природой фотонов и приводит к увеличению разрешения

Результаты вычислений сигнала совпадений в схеме Q-ОСТ были проведены в [11] для двух двухслойных образцов с отражением от слоев  $r = 0,1$  и  $0,2$  и расстоянием между слоями 10 мкм. В одном образце первая грань находится на поверхности, во втором погружена на 0,1 мм. в материал с дисперсией выше, чем у стекла тяжелый флинт. В качестве нелинейной среды для даун конверсии и получения спутанных фотонов для максимального приближения к эксперименту был рассмотрен конкретный случай, в котором для параметрического рассеяния и получения спутанных фотонов был рассмотрен нематический жидкий кристалл – ВВО ( $\beta$  barium borate), длина волны лазерной накачки 406 нм. В нелинейном кристалле за счет параметрического рассеяния (даун конверсии) малая часть энергии накачки ( $\lambda_n = 406$  нм) преобразуется в широкополосное излучение сигналов двух волн, сосредоточенных вблизи длины волны  $2\lambda_n = 812$  нм.

Результаты расчета скорости совпадений в зависимости от задержки интерферирующих волн для двух случаев расположения образца представлены на рис 2а,б сплошной яркой кривой. Менее яркой изображены данные, полученные из расчета для случая традиционной томографии. Из рисунка видно, что при погружении образца в материал с дисперсией картины Q-ОСТ и традиционного ОКТ существенно различаются, и демонстрируют преимущество метода Q-ОСТ, а для случая, когда излучение сразу падает на переднюю грань образца различие между двумя методами незначительное

Таким образом, квантовая томография (Q ОСТ), судя по расчетам, дает разрешение, в пределах 2мкм и оказывается не чувствительной к дисперсии по сравнению с традиционной ОКТ, однако требует большего времени из-за низкой энергии широкополосного сигнала. Все вышеизложенное относится к расчетам К настоящему времени появились расчеты поляризационной Q ОСТ для определения двупреломления и анизотропии рассеяния [13]. Реальные эксперименты с использованием квантовой томографии были проведены в 2008 году по исследованию шелухи лука.[14].

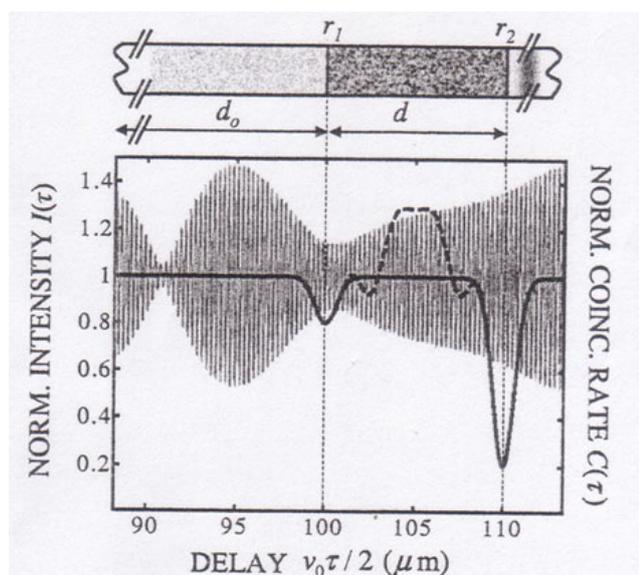


Рис. 2.

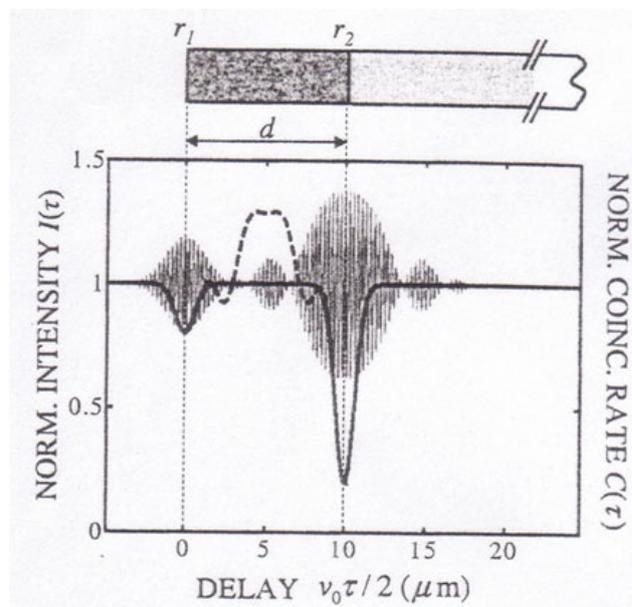


Рис. 3

### Метод чирпованных импульсов

Несмотря на некоторые дополнительные возможности метода Q\_ОСТ, рассмотренные в работе [11] (нечувствительность разрешения к дисперсии материала, возможность измерения частотной зависимости показателя преломления материала) по сравнению с традиционным

методом ОСТ, существенным недостатком этого метода является низкая интенсивность широкополосного излучения перепутанных фотонов, возникающих за счет параметрического рассеяния небольшой части излучения монохроматической накачки. Это уменьшает чувствительность и требует увеличение времени наблюдения для получения информации об объекте. Привлекательность идеи Q-ОСТ и необходимость увеличения мощности источника ОСТ привело к исследованию возможностей создания классического аналога метода Q-ОСТ/. Такой метод впервые был рассмотрен в работе [15], где, в качестве классического аналога излучения пары перепутанных фотонов было предложено использование пары противоположно chirпованных лазерных импульсов, у которых на длительности импульса частота меняется по линейному закону. Изменения частоты для двух различных импульсов подбирается так, чтобы у одного вида импульсов на длительности импульса частота возрастала по линейному закону, у другого убывала по тому же закону по отношению к первоначальной частоте импульса. Это означает, что в каждый момент времени два импульса имеют частоты  $\omega_0 + \Omega$  и  $\omega_0 - \Omega$ , где  $\omega_0$  средняя мгновенная частота этих импульсов и сумма частот остается постоянной и равной  $2\omega_0$ . Таким образом, изменение частоты двух видов импульсов оказывается анти коррелированным, как это имеет место в случае перепутанных фотонов. Антикорреляция означает, что в сумме этих импульсов при отсутствии между ними запаздывания происходит компенсация chirпа и частотное заполнение по всей длительности суммарного импульса остается постоянным и равным начальной частоте до chirпования. Это свойство компенсации chirпа антикоррелированных по частоте импульсов при их пространственном (временном) совпадении, что имеет место при интерференции, было предложено для создания схемы ОСТ. В англоязычную литературу этот метод вошел как Chirp Frequency OСТ или CF OСТ. При экспериментальной реализации этого метода [16, 17] была использована схема интерферометра Маха Цандера. На полупрозрачный входной светоделитель интерферометра (50/50) одновременно с двух сторон поступают chirпованный и анти chirпованный импульсы, которые распространяются в двух плечах интерферометра.. В одном плече излучение рассеивается от объекта, в другом плече опорного сигнала размещена регулируемая задержка. На выходе после прохождения каждого плеча оба луча попадают на выходной светоделитель. В традиционной ОКТ после светоделителя интерферирующие лучи поступают на фотодетектор. В методе CF-ОСТ после выходного светоделителя лучи направляются на нелинейную среду (кристалл ВВО), на выходе которой в отсутствии ограничений, связанных с фазовым согласованием падающей волны и волн, возникающих на нелинейности кристалла (суммарной или удвоенной частоты), получаем квадрат входного сигнала:

$$P_{\text{вых}} = (A_+(t) + A_-(t))^2 = A_+^2(t) + A_-^2(t) + 2A_+(t)A_-(t)$$

Где  $A_+(t)$  и  $A_-(t)$  - поля опорного и сигнального плеча интерферометра, каждый из которых представляет сдвоенный из chirпованного и анти chirпованного импульсов, центральная частота которого отличается от центральной частоты на выходе импульсного лазера

Нелинейная среда осуществляет удвоение и сложение оптических частот распространяющихся в среде сигналов, т.е. - sum frequency generation (SFG) [17]. Как правило, при распространении в толстом кристалле нелинейной среды фазовое согласование подбирается только для сигнала суммарной частоты (третий член), который соответствует интерференционному сигналу поступающих в среду импульсов, и таким образом, на выходе оказывается только сигнал, несущий информацию о структуре исследуемого объекта.. Затем сигнал суммарной частоты двух волн, направляется на дифракционную решетку и щелевую диафрагму, которые используются в качестве узкополосного фильтра на частоту  $2\omega_0$  с полосой 0,4 нм. Это излучение детектируется усиливающим кремниевым фотодетектором. На выходе фотоприемника измеряется интенсивность интерференционного сигнала, chirпованных импульсов до их полного пространственного и временного совмещения. Изменением величины задержки сигнала в опорном плече такое совмещение chirпованных и анти chirпованных импульсов достигается, при этом на выходе частоты chirпа пропадают и в зависимости сигнала фотодетектора от задержки появляется провал, фиксирующий

положение источника рассеяния. Фазовое согласование только нужных сигналов и только его регистрация на выходе является одним из преимуществ использования SFG., что обеспечивает отсутствие на выходе фотоприемника дополнительных шумов, связанных с сигналами удвоенных частот.

Результирующий сигнал кросс корреляции chirпованных импульсов аналогичен сигналу на выходе схемы совпадений перепутанных фотонов и отражает кросс корреляцию интенсивностей двух сигналов: chirпованных в случае схемы CF\_ОСТ и перепутанных фотонов в случае схемы Q\_ОСТ.

Функция корреляции интенсивностей двух интерферирующих волн chirпованных импульсов -  $S(\tau)$ , измеренная фотоприемником, на выходе нелинейного сумматора оптических частот на нелинейном кристалле, запишем в виде:

$$S(\tau) = Y_0 - \text{Re}Y(\tau) \quad (2)$$

$$\text{Где } Y_0 = \int d\Omega I(\Omega)I(-\Omega)|H(\Omega)|^2 \quad (2')$$

$$Y(\tau) = \text{Re} \int d\Omega I(\Omega)I(-\Omega)H(\Omega)H^*(-\Omega)e^{-2j\Omega\tau} \quad (2'')$$

где  $I(\Omega)$  и  $I(-\Omega)$  и  $H(\Omega)$  и  $H(-\Omega)$  интенсивности спектра импульсов и функция рассеяния этих импульсов от всей структуры объекта. Сигнал на выходе CF-ОСТ аналогичен сигналу на выходе Q-ОСТ, если  $I(\Omega)I(-\Omega)$  равен суммарному спектру спутанных фотонов

Для иллюстрации метода в качестве объекта исследований было взято покровное стекло микроскопа толщиной  $186, \pm 0,3$  мкм. Источником излучения служил импульсный титано сапфировый лазер с синхронизацией мод с частотой повторения 80 МГц, с центральной частотой заполнения импульса соответствующей длине волны 790 нм, и с длительностью импульсов 110fs. при средней мощности 2,8 W. Длительность chirпованных импульсов составляла около 50ps.

Результаты экспериментов проведенных в работе [16] представлены на Рис 3(a и b) На каждом рисунке представлены 2 зависимости нормализованного сигнала с выхода детектора от изменения задержки в одном из плеч интерферометра На рисунках приводятся особенности сигнала связанного с отражением от передней и задней грани исследованного образца. Рис 3а и 3б, получены соответственно при отсутствии и наличии кальцитовых блоков, обладающих дисперсией.

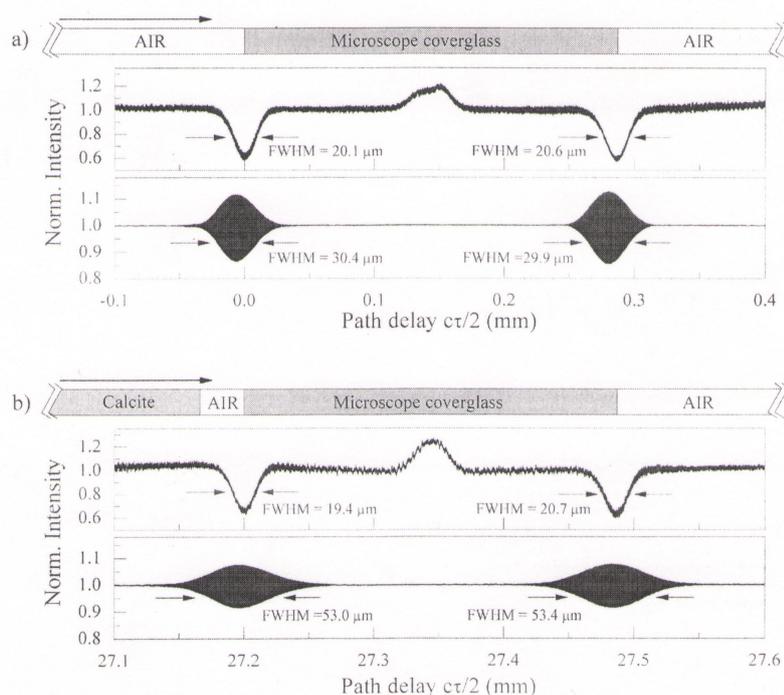


Рис3.(а, б)

Верхние кривые рисунков соответствуют результатам, полученным методом CF\_ОСТ, нижние - полученным традиционным методом ОКТ. Для этого часть излучения с выходного анизотропного светоделивателя схемы CF-ОСТ ответвлялась на схему традиционного ОКТ, в котором фиксировался сигнал интерференции полей, а не интенсивностей. На рисунке (3а) видно, что результаты, двух методов, фиксирующие отражающие поверхности пробного стекла микроскопа, отличаются незначительно. Ширины сигналов отражения для CF\_ОСТ и ОКТ равны соответственно 20мкм. и 30 мкм. Из Рис (3b) видно, что после размещения диспергирующей среды (кальцита) в одном из плеч интерферометра, сигнал рассеяния в методе CF\_ОСТ остался прежним (ширина провала 20мкм), для метода ОКТ увеличился до 50 мкм. Это демонстрирует компенсацию дисперсии в методе CF\_ОСТ аналогично методу Q-ОСТ.

### Выводы

Анализ новых методов ОКТ позволяет сформулировать их особенности и отличие от методов традиционной ОКТ.

1. Основное отличие состоит в методах получения информации о структуре исследуемого объекта. В традиционных методах для получения информации о структуре объекта исследуется **сигнал интерференции полей**: рассеянного от объекта и поля референтного (опорного) сигнала. В новых методах информацию содержит **сигнал интерференции интенсивностей**. В методе Q-ОСТ сигнал интерференции интенсивностей получают из сигнала совпадений двух счетчиков фотонов на выходе светоделивателя схемы НОМ интерферометра. В методе чирпованных импульсов (CF-ОСТ) для получения сигнала интерференции интенсивностей сигнал, интерференции полей, полученный с выхода схемы модифицированного интерферометра Маха Цандера, подвергают двойному нелинейному преобразованию на двух последовательно расположенных элементах с квадратичной нелинейностью. Сначала это удвоитель и сумматор оптических частот, а затем традиционный фотоприемник.

2. Еще одно отличие состоит в использовании для Q-ОСТ квантового света перепутанных фотонов, для метода CF-ОСТ специально приготовленные пары чирпованных и античирпованных импульсов, антикоррелированных по частоте чирпа таким образом, что в каждый момент времени частоты импульсов оказываются равными  $\omega_0 + \Omega$  и  $\omega_0 - \Omega$ , при этом сумма частот в равна остается постоянной.

3. Одно из преимуществ новых методов состоит в том, что продольное разрешение не зависит от нелинейной квадратичной дисперсии.

Метод ОКТ на чирпованных импульсах (CF\_-ОСТ) имеет ряд преимуществ перед квантовой ОКТ (Q-ОСТ) Наиболее существенное преимущество состоит в значительном превышении мощности (несколько порядков) источника классического импульсного света, перед мощностью перепутанных фотонов, используемых в методе Q-ОСТ, Это позволяет увеличить глубину наблюдения. Кроме того метод CF\_ОСТ мало чувствителен к разности потерь в плечах интерферометра. По мнению авторов, этот метод также позволяет увеличить устойчивость к вибрациям.

Исходя из опубликованных данных в настоящий момент продольное разрешение новых методов (Q-ОСТ – расчет 2мкм, CF\_-ОСТ – эксперимент 6-19мкм) ниже чем разрешение, достигнутое методами традиционного ОКТ с использованием составного источника (20 длин волн в диапазоне 480-700нм) и цифрового томографического микроскопа. – 0,7мкм. [4]. Вопрос о возможном предельном разрешении новых методов пока остается открытым.

Преимущество новых методов, связанное с исключением дисперсии в продольном разрешении структуры объекта на данный момент не представляется достаточно актуальным, поскольку в литературе появились работы [18] с описанием методов математической обработки выходного сигнала традиционного ОКТ, позволяющие исключить влияние дисперсии.

В техническом оснащении оба рассмотренных метода оказываются достаточно сложными и их экспериментальная реализация представлена лабораторными установками, далекими от переносного приборного варианта и в настоящее время не представляют какой

либо конкуренции для традиционного метода ОКТ с применением волоконных интерферометров и малогабаритных полупроводниковых широкополосных (в том числе составных) или перестраиваемых источников излучения.

Однако метод CF-ОСТ ввиду высокой мощности источника излучения может представлять интерес для исследования слабо рассеивающих сред.

Работа поддержана грантом РФФИ - 11 – 02 - 01326-а

## Литература

1. Bouma B.E. and Tearney G.J., eds. Handbook of Optical Coherence Tomography, Marcel Dekker, Inc.: (New York, Basel, 2002).
2. Руководство по оптической когерентной томографии. // Под редакцией д.м.н., проф. Н.Д. Гладковой, д.м.н., Н.М. Шаховой, чл. - корр. РАН, д.ф. - м.н. А.М. Сергеева // (М.: Физматлит, 2007, 296с.)
3. Optical Coherence Tomography (Technology and Application) Springer, Berlin. Heidelberg, New York (2008)  
Editors: Wolfgang Drexler, James G. Fujimoto.
4. Montfort F., Colomb T., Charriere F., Kuhn J., Marquet P., et al. Appl. Opt., Vol.45, No32? (2006),
5. Килин С.Я., УФН, Том169, N5, С. 507-526? (1999)
6. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая Когерентности Квантовая Оптика// Под редакцией проф. Самарцева В.В. (Физматлит, 2000г)
7. Hong C.K. and Mandel L., Phys. Rev. A, 31, N4, 2409 (1985)
8. Rarity J., Tapster I, Opt.Soc.Am. B. ,6, 1221-1226 (1989)
9. Ghosh R and Mandel L.I, Phys.Rev.Letters, 59, 1902-1905 (1987)
10. Larchuk T, Teijh M, Saleh B. Phis. Rev. A 52, 4145 – 4153 (1995)
11. Abouraddy A.F. et al. Phys. Rev. A 65, 053817(1-6), (2002).
12. Hong C.R., Ou Z.Y. and Mandel L., Phys. Rev. Lett.V 59, P. 2044, (1987)
13. Booth M., et al., Phys. Rev. A 69, 043815(1-8) (2004)
14. HYPERLINK "<http://arxiv.org/abs/0809.4721>"
15. Kalternbaek R., Lavole J., Biggerstaff D.N. and Resch K.J., . Nature Physics, |Vol. 4| P. 864-8068, (2009)
16. .Lavole J., Kalternbaek R and Resch K.J., Optics Express, Vol,17,No,5, P. .3813-3825, (2009)
17. Avi Peer, Bromberg Y., Dayan B, Silberberg and Friesem A, Optics Express Vol 15, No.14, P. 8760-8769, (2007)
18. .Banaszek K, Radunsky A.S., Walmstley I.A., Optics Communications, 269-P. 152-155, (2007)

### **Подписи к рисунку**

Рис1а Схема квантовой томографии: 1,2 – излучение перепутанных (сигнального и холостого) фотонов, поступающих на два плеча НОМ интерферометра, 3 – объект исследования, 4 – регулируемая задержка, 5 – делительная пластинка, 6 счетчики фотонов, 7 – схема совпадений. 1б. Схема томографии на чирпованных импульсах. 1, 2 – излучение чирпованных (1) и анти чирпованных (2) импульсов, 3 – объект исследования, 4 – регулируемая задержка, 5 – светоделитель, 6 – фотодиод, 7 – диафрагма, 8 – диффракционная решетка.