

Национальная Академия наук Украины
Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины
Институт физики полупроводников НАН Украины им. В.Е. Лашкарева
ПАО «НПК «Наука»
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Сборник научных трудов
V Международной научной конференции

«ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БАЗА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ»

30 сентября - 5 октября 2012г.

Харьков - Кацивели
2012

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НИЗКО-КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Лукин К.А.¹, Мачехин Ю.П.², Данаилов М.Б.³, Татьянко Д.Н.¹

¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
61085, г. Харьков, ул. Академика Проскуры, 12, тел.: (057) 720 33 49,
e-mail: lukin.konstantin@gmail.com, lukin@ire.kharkov.ua

²Харьковский национальный университет радиозлектроники
г. Харьков, пр. Ленина 14, тел. (057) 702-14-84, факс (057) 702-10-13

³Laser Laboratory, Synchrotron, SS14, km.163.5, 34012, Trieste, Italy

Various wideband noise optical sources for optical coherence tomography have been considered. It has been shown that ultra-bright light emitting diodes are appropriate source for optical coherence tomography and other applications.

Введение

Оптическая томография основанная на оптической когерентности (optical coherence tomography - ОКТ) - активно развивающееся направление неразрушающего исследования профиля различных поверхностей. Наиболее широкое применение ОКТ получила в медицине, особенно в офтальмологии. Благодаря ОКТ у медиков появилась возможность осуществлять неинвазивное исследование поверхностных слоев роговицы глаза с разрешающей способностью получаемого изображения единицы микрометров. Помимо медицины ОКТ применяется в бумажной промышленности для контроля качества поверхности бумаги. Интересное направление применения метод ОКТ получил в искусстве для исследования поверхности картин.

Метод низко-когерентной ОКТ (НК-ОКТ), основанный на спектральной интерферометрии, состоит в формировании периодического чередования максимумов и минимумов на оси частот спектра, которые являются следствием линейной интерференции гармонических спектральных составляющих широкополосных случайных сигналов, суммируемых на выходе интерферометра, при условии, что разность плеч интерферометра превышает длину когерентности источника излучения [1]. Основным инструментом ОКТ и НК-ОКТ являются интерферометры, такие, как интерферометры Майкельсона, Маха-Цандера и Фабри-Перо, в одно из плеч которых помещен исследуемый объект.

Разрешающая способность изображений, получаемых в ОКТ определяется длиной когерентности широкополосного источника излучения, используемого для реализации метода:

$$l_c = \frac{c}{\Delta f}, \quad (1)$$

где Δf - ширина частотного спектра источника излучения; c - скорость света в вакууме.

Поэтому, чем больше ширина спектра излучения источника, тем меньше длина когерентности и, следовательно, лучше разрешение получаемых изображений. При этом максимальный измеряемый диапазон расстояния определяется уже не характеристиками источника излучения, а разрешающей способностью используемого спектрометра.

Широкополосные источники излучения. Для реализации метода спектральной интерферометрии и получения канавчатого спектра, т. е. спектра имеющего периодическую структуру, необходимы широкополосные источники излучения, с шириной полосы десятки и сотни нанометров и достаточно большой мощностью излучения — десятки милливатт и выше.

Результаты исследований канавчатого спектра, полученного методом спектральной интерферометрии, описаны в литературе по измерениям микро- и нанорасстояний [2-4] в которых использовались низко-когерентные источники излучения с широкой спектральной полосой. Эта область измерений называется низко-когерентной

интерферометрией (low-coherence interferometry) или спектральной интерферометрией белого света (white-light spectral interferometry).

Наиболее часто используемым источником излучения в ОКТ являются суперлюминесцентные диоды благодаря их большой спектральной мощности и относительно небольшой стоимости [3]. Суперлюминесцентный диод (СЛД) (англ. superluminescent diode) — это светоизлучающий диод, работающий в режиме суперлюминесценции. СЛД обладает характеристиками, необходимыми для реализации ОКТ, присущими светодиодам и лазерам. В СЛД, подобно полупроводниковым лазерам, усиливается спонтанное излучение р-п перехода. Но, в отличие от лазеров у СЛД нет отражающих зеркальных поверхностей, т. е. нет резонатора, в результате чего излучение на выходе СЛД не является монохроматичным, как у лазера, и содержит все длины волн в диапазоне усиления, т.е. обладает широким спектром, как у светодиодов, необходимым для реализации метода ОКТ.

Таким образом, положительными качествами СЛД являются большая мощность излучения — десятки милливатт, как у лазеров и широкая спектральная полоса, как у светодиодов, десятки нанометров. Для большего проникновения в ткани сейчас используются СЛД с длиной волны 1300 нм, которые могут достигать аксиального разрешения 10 мкм. Для применений ОКТ необходима большая, чем у СЛД ширина спектра с соответствующим разрешением. Поэтому интенсивное развитие технологий привело к появлению составных СЛД. Ширина спектра такого источника превышает 150 нм и, соответственно, он имеет лучшее аксиальное разрешение — 3-5 мкм.

Еще одним видом источников излучения, которые используются для реализации метода ОКТ являются различные лампы (галогенные и т. д.) [4]. Они обладают большой шириной спектра излучения, достаточной мощностью и более низкой по сравнению с СЛД стоимостью. Галогенные лампы являются лампами накаливания, в баллон которых закачан галогенный газ (бром или йод). Благодаря этому такие лампы дольше работают (2 тыс. -12 тыс. часов) и имеют большую яркость по сравнению с обычными лампами накаливания (15-22 лм/Вт). Но их недостатками по сравнению, например, со светодиодными источниками излучения, являются их высокое энергопотребление, значительно меньший срок службы (у светодиодов — от 25 тыс. до 100 тыс. часов работы), меньшая яркость свечения (светодиодные лампы достигают 120 лм/Вт). Также они обладают относительно малой спектральной плотностью, что не позволяет в достаточной мере «прорисовывать» необходимую форму спектра.

В исследовательских приложениях, в качестве источников излучения для ОКТ применяются также фемтосекундные лазеры (ФЛ), имеющие чрезвычайно широкий спектр излучения (сотни нанометров) в инфракрасном диапазоне с центральными длинами волн 800 нм, 1000 нм, 1300 нм. Эти длины волн излучают полупроводниковые ФЛ, например, $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$, Nd:Glass или Yb fiber , и Cr:Forsterite лазеры. Аксиальное разрешение изображения в ОКТ системах с использованием данных лазеров достигает 1-4 мкм. Основным недостатком ФЛ является их сравнительно большая стоимость, что накладывает ограничение на сферу их применения.

Для реализации ОКТ и других практических применений, основанных на методе спектральной интерферометрии, можно использовать светодиоды. Светодиоды в ОКТ и НК-ОКТ практически не применяются и используются в редких случаях в научных исследованиях для реализации метода спектральной интерферометрии.

Авторами предлагается в качестве наиболее перспективных источников излучения в НК-ОКТ и других практических применениях, основанных на методе спектральной интерферометрии, использовать обычные светодиоды с повышенной яркостью свечения, которые массово выпускаются для решения задач индикации и локального освещения.

Основным недостатком светодиодов перед СЛД для реализации спектральной интерферометрии являлась их недостаточная мощность излучения. Но в последнее время на рынке появляются светодиоды, обладающие повышенной мощностью излучения, сравнимой с мощностью излучения СЛД. Это дает возможность заменить относительно

дорогостоящие СЛД дешевыми сверх яркими светодиодами, разница в цене между которыми достигает порой нескольких порядков.

Экспериментальное исследование светодиодов для ОКТ. В работе исследовались два типа светодиодов. Первый светодиод - выпускаемый фирмой Toshiba InGaAlP светодиод TLRH190P. Его центральная длина волны излучения - 645 нм. Ширина спектра излучения на уровне 3дБ составляет 15-18 нм, что достаточно для формирования периодичной структуры спектра. Излучение на выходе светодиода имеет полный угол расходимости 4° . Сила света равна 19 кд.

Второй светодиод OSHR5111P от фирмы OptoSupply. Сила света данного светодиода 50 кд, длина волны излучения по паспорту 625 нм (у экспериментального образца - около 637 нм), угол излучения на уровне 3дБ максимальной интенсивности излучения составляет 15 град, ширина спектра около 20 нм.

Светодиоды исследовались при помощи интерферометра Майкельсона. Спектр излучения на выходе интерферометра при разности плеч, превышающей длину когерентности излучения светодиодов, а также результат Фурье-обработки спектра показаны на рис. 1 для светодиода Toshiba TLRH190P [2] и на рис. 2 для светодиода OptoSupply OSHR5111P.

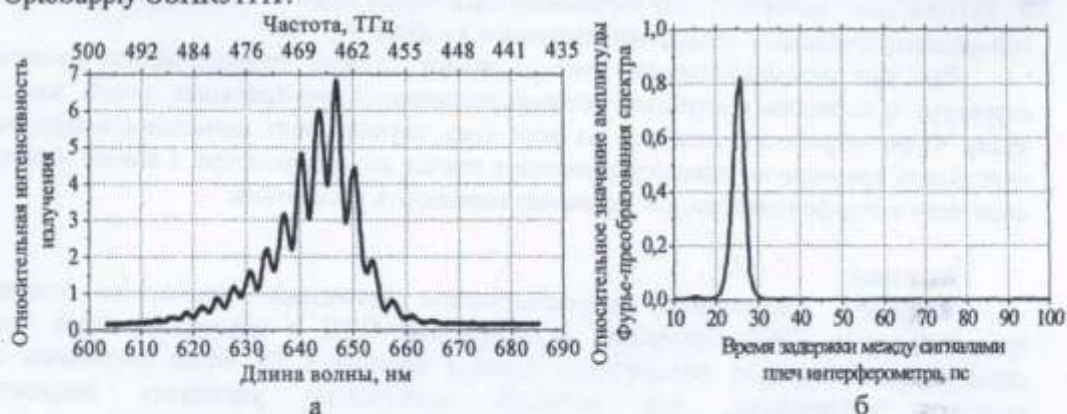


Рис. 1. Характеристики светодиода Toshiba TLRH190P: а) спектр излучения на выходе интерферометра Майкельсона, с разностью плеч, превышающей длину когерентности излучения. б) результат Фурье-обработки спектрограммы рис. 1а.

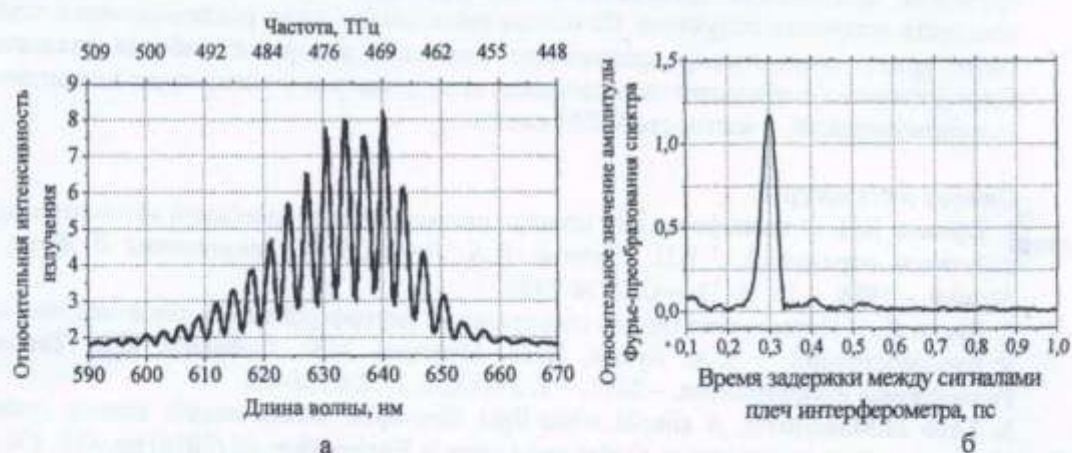


Рис. 2. Характеристики светодиода OptoSupply OSHR5111P: а) спектр излучения на выходе интерферометра Майкельсона, с разностью плеч, превышающей длину когерентности излучения. б) результат Фурье-обработки спектрограммы рис. 2а.

На рис. 3а и 3б, для сравнения, показаны спектр излучения СЛД и результат Фурье обработки данного спектра соответственно, представленные в [3].

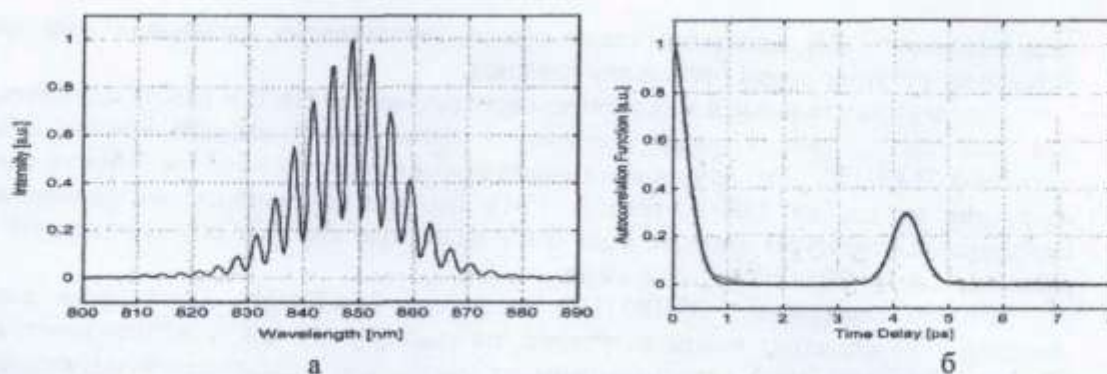


Рис. 3. Характеристики СЛД: а) измеренный канавчатый спектр на выходе волоконного интерферометра Фабри-Перо на базе СЛД [3] – зависимость интенсивности от длины волны излучения; б) автокорреляционная функция спектра на рис. 1а.

Оценочные значение контраста интерференционных спектральных линий, т.е. степени различимости периодических спектральных линий для светодиода Toshiba TLRH190P составляет 0,27, для светодиода OptoSupply OSHR5111P составляет 0,45, а для суперлюминисцентного диода, используемого в работе [3], - 0,6.

Все три рассматриваемых спектра имеют схожую периодическую канавчатую структуру с хорошим контрастом интерференционных спектральных линий. Благодаря этому Фурье-обработка спектров во всех трех случаях дает возможность однозначно определить временную задержку сигналов в плечах интерферометра, а значит и разность длин плеч интерферометров, т.е. позволяет определять расстояния.

Выводы

В работе рассмотрены широкополосные источники оптического излучения, применяемые в ОКТ. Сравнение характеристик СЛД с обычными сверх яркими светодиодами, показало возможность замены дорогих СЛД более дешевыми сверх яркими светодиодами, что позволит значительно удешевить медицинское диагностическое и другое оборудование, основанное на НК-ОКТ.

Сетки оптических частот, предложенные в [5] и основанные на генерации широкополосного канавчатого спектра методом спектральной интерферометрии служат примером приложения спектральной интерферометрии, где не требуется большая мощность источника излучения. На основе таких сеток частот, реализованных с помощью сверх ярких светодиодов, предлагается создавать недорогие рабочие эталоны для метрологического обеспечения оптических спектрометров и аппаратуры для оптических телекоммуникаций, в частности WDM-систем.

Список литературы:

1. Ефимов Б.П. О трансформации спектра стохастических колебаний автогенератора под действием отражений. / Б.П. Ефимов, К.А. Лукин, В.А. Ракитянский // Журн. техн. физики. – 1988. – 58, № 12. – С. 2398-2400.
2. Лукин К.А. Применение метода спектральной интерферометрии для измерения микро- и нанорасстояний. / К.А. Лукин, Ю.П. Мачехин, М.Б. Данаилов, Д.Н. Татьяна // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т. 2 (16), № 1, , СС. 39-45.
3. Lazo M.Manojlović. A simple white-light fiber-optic interferometric sensing system for absolute position measurement. Optics and Lasers in Engineering, 48 (2010) pp. 486–490.
4. P. Hlubina. Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements. Optics Communications 212 (2002) pp. 65–70.
5. Лукин К.А. Создание сеток оптических частот на основе метода спектральной интерферометрии. / К.А. Лукин, Ю.П. Мачехин, Д.Н. Татьяна // Светотехника и электроэнергетика. – № 3 (27). - 2011. – С. 26-30.