

ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОТОНИКИ

14 – 17 апреля 2015 года, г. Москва

Тезисы докладов

Москва · 2015

УДК 535
ББК 22.34

*Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
(Росстандарт)*

*Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-
физических измерений»
(ФГУП «ВНИИОФИ»)*

Метрологическое обеспечение Фотоники: тезисы докладов
Всероссийской научно-технической конференции – количество листов

ISBN 978-5-9906642-0-3

УДК 535
ББК 22.34

ISBN 978-5-9906642-0-3

© Авторы докладов
© ФГУП «ВНИИОФИ»

СОДЕРЖАНИЕ

- 1. Метрологическое обеспечение в области волоконно-оптических систем** стр. 9
В.С. Иванов, В.Е.Кравцов, В.Н. Крутиков, С.В. Тихомиров,
ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва
- 2. Измерение фотометрических, спектрорадиометрических и пространственных характеристик излучения твердотельных источников в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра** стр.19
С.В. Никоненко, Е.В. Луценко, А.В. Данильчик, В.А. Длугунович, В.А. Ждановский, А.В. Крейдич, А.А. Липлянин, М.В. Ржеуцкий, Институт физики НАН Беларуси, г. Минск
- 3. Ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом для исследования внесолнечных планет** стр.24
П.Н. Фролов, Институт Космических Исследований РАН Москва
- 4. Установка для калибровки фотоприемников в диапазоне длин волн 0,25-14,0 мкм** стр.27
А.Ю. Дунаев, В.Н. Крутиков, С.П. Морозова, В.И. Саприцкий, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 5. Результаты сличений вторичных эталонов единицы спектральных коэффициентов направленного пропускания с государственным первичным эталоном ГЭТ-156-91** стр.31
А.А. Катышева, Б.Е. Лисянский, С.П. Морозова, М.А. Солодилова, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 6. Широкополосные суперлюминесцентные диоды с квазигауссовой формой спектра** стр.35
Е.В. Андреева^а, С.Н. Ильчинко^а, Ю.О. Костин^а, М.А. Ладугин^б, П.И.Лапин^а, А.А. Мармалюк^б, С.Д. Якубович^в,^аООО «Оптон», Москва, ^бОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха, Москва, ^вМГТУ МИРЭА, Москва
- 7. Обеспечение единства измерений фотометрических характеристик малых уровней** стр.39
Т.Б. Горшкова, Е.А. Ивашин, Г.Н. Толстых, С.С. Широков, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 8. Разработка алгоритма и программы расчета предельно допустимых уровней лазерного излучения для макетирования оптико-электронных узлов приемопередающей системы дальномеров** стр.45
С.И. Пырикова, ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево

9. **Измерение энергетических характеристик импульсного лазерного излучения сверхмалой интенсивности с помощью электронно-оптической камеры в режиме счета фотонов** стр.48
 М.В. Канзюба, А.Б. Берлизов, Г. Г. Фельдман,
 ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва
10. **Вопросы метрологии и лазерной безопасности при работе с мощными технологическими лазерами** стр.51
 О.Б. Бибик к.т.н., С.Д. Ворончук к.т.н., К.В. Канаев инж.,
 ООО «НТО ИРЭ-Полус», Фрязино, Московская обл.
11. **Использование синхротронного излучения для исследования характеристик многослойных наноструктур в области экстремального ультрафиолета** стр.55
 С.И. Аневский, О.А. Минаева, Р.В. Минаев, А.В. Евмененко,
 О.Ю. Морозов, Т.Д. Бельмега, А. Рахматулин,
 ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
12. **Измерения параметров источников синхротронного излучения для повышения точности воспроизведения и передачи спектрорадиометрических единиц** стр.57
 С.И. Аневский, О.А.Минаева, Р.В. Минаев, А.В. Евмененко,
 Е.С. Кононогова, А.И.Машилов, А.В. Горонков,
 ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
13. **Исследование характеристик телескопа и ПЗС матриц с использованием синхротронного излучения** стр.60
 С.И. Аневский, О.А.Минаева, Р.В. Минаев, Б.С. Волков, А.В.
 Евмененко, А.И.Машилов, А. Грязнов,
 ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
14. **Чем хуже спектральное разрешение прибора, тем лучше** стр.62
 В.Н. Кузьмин, А.Л. Марьин,
 НТП «ТКА» Санкт – Петербург
15. **Разработка стандартного образца для обеспечения единства оптических измерений дзета-потенциала** стр.66
 А.Д. Левин¹, М.К. Аленичев¹, Е.А. Шмыткова¹, В.М. Масалов²,
 Г.А. Емельченко²,
¹ФГУП «ВНИИОФИ», Москва,
²ФГБУН «Институт физики твердого тела РАН», Черноголовка
16. **Линейный гетеродинный прием и его применение для метрологических исследований передачи эталонных сигналов с помощью последовательностей фемтосекундных лазерных импульсов** стр.70
 Н.П. Хатырев, А.А. Щербина,
 ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

- 17. Измерение квантового выхода флуоресценции полупроводниковых наночастиц** стр.76
 А.Ю. Садагов¹, С.В. Ремпель²,
 Ю.В. Кузнецова², А.Д. Левин¹,
¹ФГУП «ВНИИОФИ», Москва,
²ФГБУ «Институт химии твердого тела», Екатеринбург
- 18. Применение микрорезонаторов с модами типа «Шепчущей галереи» для измерения поглощения, рассеяния и коэффициентов нелинейностиновых материалов для фотоники** стр.79
 В.Л. Лясковский, И.А. Биленко, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 19. Применение вейвлет-преобразования для фильтрации шумов цифровых изображений** стр.83
 А.А. Петухов, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 20. Метрологическое обеспечение определения содержания элементов в чистых веществах** стр.86
 Я.И. Ермакова, А.В. Иванов, Н.П. Муравская, Е.А. Рекстина, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 21. Влияние использования модельных растворов на точность измерений элементов в сложных матрицах** стр.89
 Н.П. Муравская, А.В. Иванов, Я.И. Ермакова, И.Н. Зябликова, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 22. О проведении сличений государственного первичного эталона ГЭТ 196-2011** стр.93
 Н.П. Муравская, А.В. Иванов, Я.И. Ермакова, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 23. Национальный эталон республики Беларусь для волоконно-оптических систем связи и передачи информации** стр.97
¹В.А.Длугунович, ¹А.В. Исаевич, ¹С.В. Никоненко,
¹А.В. Холенков, ²С.В. Тихомиров, ²А.И. Глазов, ²А.Б. Светличный, ²М.Л. Козаченко, ³А.В. Гальго,
¹Институт физики НАН Беларуси, г. Минск,
²ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, ³РУП «БелГИМ», г. Минск
- 24. Система сравнений шкал времени с использованием волоконно-оптической линии связи** стр.101
 С.С. Донченко, О.В. Колмогоров, Д.В. Прохоров, ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево
- 25. Методика и аппаратура прямых измерений скорости передачи в оптических системах передачи информации** стр.104
 И.С. Королёв, Н.П. Хатырев, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

- 26. Результаты международных сличений в области волоконно-оптических систем передачи информации** стр.110
А.И. Глазов, В.В. Григорьев, В.Е. Кравцов, А.Б. Светличный,
С.В. Тихомиров, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 27. Метод передачи эталонных сигналов времени по волоконно-оптической линии** стр.113
А.П. Фокин¹, К.Б. Савкин¹, С.В. Тихомиров²,
1 ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи Московской
обл., 2 ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 28. Метод повышения динамического диапазона когерентного рефлектометра на основе оптимальной спектральной фильтрации** стр.116
А.А. Жирнов, К.В. Степанов, А.С. Хаперский, Е.Т. Нестеров,
А.Б. Пнёв, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва,
НОЦ «Фотоника и ИК-техника», Москва
- 29. Измерение ослабления пластиковых сцинтилляционных светодиодов при растяжении** стр.119
Д.А. Дворецкий, А.Б. Пнев, В.Е. Карасик,
МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва
- 30. Мобильная установка для измерения дисперсии фотонно-кристаллических волокон** стр.123
А.В. Борисова, Т.А. Ишбердина, А.О. Чернуцкий,
Я.А. Денисова, К.В. Степанов, А.Б. Пнёв,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва,
НОЦ «Фотоника и ИК-техника», Москва
- 31. Оптические характеристики двухканальных сплавных WDM-демультиплексоров в условиях внешних воздействий** стр.127
С.Г. Елизаров, Н.Т. Ключник, В.А. Кузнецов, В.С. Чижов,
М.Я. Яковлев, ЗАО «ЦНИТИ» Техномаш-ВОС», Москва
- 32. Распределенные волоконно-оптические датчики температуры и деформации и вопросы их метрологического обеспечения** стр.130
В.В. Григорьев, В.Е. Кравцов, А.К. Митюрёв, С.В. Тихомиров,
Н.П. Хатырев, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 33. Установка для измерений нелинейности градуировочной характеристики приемников оптического излучения для ВОСП** стр.136
С.Б.Бычков, А.И. Глазов, А.Б. Светличный,
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

- 34. Тенденции метрологического обеспечения измерений параметров сверхкоротких электромагнитных импульсов на основе аналоговой фотоники** стр.139
К.Ю. Сахаров, А.В. Сухов, В.А. Туркин, О.В. Михеев,
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 35. Исследование погрешностей алгоритма восстановления профиля оптической поверхности** стр.143
Я.В. Гладышева, Н.В. Барышников, И.В. Животовский,
Д.Г.Денисов, А.Б. Пнев, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
- 36. Оценка погрешности реконструкции фазовых проекций в оптическом томографе** стр.146
М.И. Латушко, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 37. Предобработка томографических проекций, полученных на сканирующем сдвиговом интерферометре** стр.149
Н.А. Некрасов, ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 38. Применение комплекта мер флуоресценции КМФ в области лабораторной медицины** стр.151
Н.Ю. Грязских, Н.П. Муравская, М.М. Чугунова,
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва
- 39. Разработка метода калибровки источника переменного давления на датчике постоянного давления на примере калибровки тонометра внутриглазного давления** стр.153
М.М. Ермаков¹, М.О. Ваничкина²,
1) ФГУП «ВНИИОФИ», Москва, 2) МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва
- 40. Программный комплекс автоматизированных исследований препаратов культур клеток, инфицированных хламидиями** стр.157
О.А. Артюхова, А.В. Самородов, Д.А. Добролюбова,
Л.В. Диденко, Е.А. Кост, Н.А. Зигангирова,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
- 41. Биотехническая система определения гормонального статуса рака молочной железы по микроскопическим изображениям иммуноцитохимических препаратов** стр.161
Д.А. Добролюбова, Т.А. Кравцова, А.В. Самородов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
- 42. Методика оценки контраста инфракрасных изображений тканей пародонта** стр.164
А.В. Колпаков, И.Н. Спиридонов,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

- 43. Измерение изменений оптической плотности кожных покровов лица по видеоизображению** стр.167
А.А. Таранов, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
- 44. Определение двигательной активности лица на основе текстурных дескрипторов** стр.172
М.Н. Пилипенко, Е.Ю. Латышева,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
- 45. Метрологическое обеспечение неинвазивных гемоглобинометров** стр.177
А.В. Иванов, Н.П. Муравская, Е.А. Рекстина, М.А. Солодилова,
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.С. Иванов, В.Е. Кравцов, В.Н. Крутиков, С.В. Тихомиров

ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, Россия

Развитие волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) и средств измерений, обеспечивающих диагностику систем и их элементов при производстве и эксплуатации, требует постоянного совершенствования системы метрологического обеспечения измерений параметров ВОСП. При этом единство измерений и их точность в данной области определяют качество и технические параметры самих ВОСП и их соответствие обязательным требованиям международных и государственных стандартов.

В настоящем докладе рассматриваются результаты исследований и разработок в части обеспечения единства измерений в данной области, проведенных во ВНИИОФИ за последнее десятилетие.

Специфика измерений параметров ВОСП обусловлена:

характерными энергетическими, временными и спектральными диапазонами работы лазеров и фотоприемных устройств в системах связи, а также параметрами волоконных элементов, особенностью которых являются их малые размеры и необходимость работы с излучением большой расходимости и малой мощности в инфракрасном диапазоне спектра;

важнейшим информативным параметром – мощностью излучения, которая модулируется в аналоговой или импульсной форме передаваемым сигналом. Для реализации потенциальных возможностей по широкополосности систем возникает необходимость неискаженного формирования, передачи и приема всеми элементами ВОСП оптических сигналов нано- и субнаносекундной длительности;

необходимостью создания комплексной системы метрологического обеспечения измерений не отдельных физических величин, а областей

деятельности и применения соответствующих многопараметровых пассивных и активных элементов. Отсюда задача создания специализированных и взаимосвязанных рабочих и эталонных средств измерений и поверочного оборудования для различных параметров и величин как самих систем, так и их элементов;

широким применением и массовостью контролируемой продукции, достаточно жесткими требованиями к измеряемым параметрам в совокупности с постоянной тенденцией уменьшения погрешностей из-за отставания отечественной измерительной техники от потребностей практики. Это вынуждает производить импортные закупки не только самих систем, но и соответствующего контрольно-измерительного оборудования, что нарушает метрологическую безопасность при использовании систем.

С внедрением технологий передачи информации со спектральным уплотнением каналов CWDM и DWDM в волоконно-оптических системах передачи информации (ВОСП), требования, предъявляемые к характеристикам передающей среды – оптического волокна – становятся всё более жёсткими. Расширение спектрального диапазона передачи данных, увеличение длины регенерационных участков линий связи приводят к необходимости контроля дисперсионных характеристик оптического волокна при скоростях передачи информации от 500 Мбит/с и более. Эффект хроматической и поляризационной модовой дисперсии обуславливает уширение оптического импульса во времени при прохождении через оптическую передающую среду. Уширение импульса возникает вследствие того, что скорость распространения излучения по оптическому волокну зависит от длины волны и состояния поляризации излучения. В связи с этим измерение хроматической и поляризационной модовой дисперсии (ХД и ПМД) даёт разработчикам волоконно-оптических линий связи возможность эффективно учитывать роль ХД и ПМД в технических характеристиках ВОСП, оговаривать значения ХД и ПМД в спецификации волокна и кабеля. Хроматическая и поляризационная модовая дисперсия – это параметры,

измерение которых необходимо как при производстве оптического кабеля, так и по завершению его прокладки вследствие наличия большого количества уже проложенных ВОСП с неизвестными значениями ХД и ПМД. На основании таких измерений можно принимать решения о возможности модернизации уже существующих ВОСП и оценивать предельную скорость передачи информации в проектируемых систем.

В настоящее время в результате выполненных работ завершена разработка и проведено утверждение следующих Государственных первичных специальных эталонов (ГПСЭ) и возглавляемых ими поверочных схем в данной области:

- усовершенствованный комплексный ГПСЭ единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем передачи информации ГЭТ 170-2011, характеристики которого значительно превышают характеристики имевшейся аппаратуры; разработана Межгосударственная поверочная схема ГОСТ 8.585-2013;
- ГПСЭ единицы хроматической дисперсии в оптическом волокне ГЭТ 184-2010 основан на фзово-сдвиговом методе измерения; разработана Межгосударственная поверочная схема ГОСТ 8.608-2012;
- ГПСЭ единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне ГЭТ 185-2010 основан на применении интерференционного и поляриметрического методов измерения; разработана Межгосударственная поверочная схема ГОСТ 8.607-2012;
- усовершенствованный ГПСЭ единицы мощности импульсного лазерного излучения в диапазоне 0,4 - 10,6 мкм; в стадии подготовки находится Государственная поверочная схема ГОСТ 8.198-200хх.

Результаты проведенных работ по сличениям эталонной аппаратуры по средней мощности излучения для ВОСП (ГЭТ 170-2011) по проекту КООМЕТ PR-S6 и по хроматической дисперсии (ГЭТ 184-2010) по проекту

EURAMET Project 1216 показывают сопоставимость результатов с ведущими национальными метрологическими институтами.

В обеспечение передачи перечисленных единиц разработаны следующие рабочие эталоны (РЭ), позволяющие производить поверку, калибровку и испытания широко применяемых типов средств измерений:

- РЭ единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП, обеспечивающие поверку измерителей мощности, оптических тестеров и аттенуаторов, источников и приемников излучения;

- РЭ единиц длины и ослабления в световоде, обеспечивающие поверку оптических рефлектометров;

- РЭ единицы длины для ВОСП, обеспечивающие поверку спектроанализаторов;

- РЭ единицы обратных потерь, обеспечивающие поверку анализаторов обратных потерь;

- РЭ единицы хроматической дисперсии (ХД) в оптическом волокне, обеспечивающие поверку анализаторов ХД;

- РЭ единицы поляризационной модовой дисперсии (ПМД) в оптическом волокне, обеспечивающие поверку анализаторов ПМД.

Отличительной особенностью метрологических разработок и услуг является их комплексность (охватывает СИ основных параметров в ВОСП) и завершенность, как в части внедрения рабочих эталонов, так и индивидуальной настройки и метрологических исследований с выдачей необходимой нормативно-методической документации и возможностью обучения поверителей и аккредитацией на данный вид деятельности.

Разработанные рабочие эталоны, поставляются заинтересованным метрологическим организациям Росстандарта, Ростелекома, Связьтранснефти и др. и их общее количество составляет около 100 штук.

Волоконно-оптическая техника относится к ключевым технологиям, направленным на резкое расширение военно-технических возможностей информационных систем всех видов вооружения и военной техники. Ее

использование позволит обеспечить существенное повышение боевой эффективности управления войсками и оружием, в том числе при непосредственном применении последнего. В разрабатываемых в настоящее время Федеральных программах по развитию ВВТ волоконно-оптическим системам передачи отводится одно из приоритетных мест.

Поэтому кроме перечисленных работ в данном направлении, для обеспечения задач метрологической службы Вооруженных Сил в 2007-2009 г.г. был создан военный эталонный комплекс (5 эталонов) основных параметров ВОСП ВЭК-54, возглавляющий соответствующую военную поверочную схему.

Военный эталонный комплекс (ВЭК-54) основных параметров ВОСП, разработанный в рамках ОКР «Навет-ВОСП» по номенклатуре параметров соответствует разработанному Государственному специальному эталону ГЭТ170-2006 и поверочной схеме ГОСТ8.585-2005, и может аттестоваться и получать единицы, при этом сохраняя возможность независимой аттестации.

Завершена ОКР в интересах метрологической службы вооруженных сил РФ «Разработка комплекта средств метрологического обеспечения цифровых систем передачи». «Индекс-ЦС», которая является логическим продолжением ОКР «Навет-ВОСП» вследствие бурного развития высокоскоростных цифровых ВОСП со спектральным уплотнением.

Разработан комплект военных рабочих эталонов единиц:

- поляризационно – модовой дисперсии;
- хроматической дисперсии;
- фазового дрожания и показателей битовых ошибок для оптических интерфейсов;
- фазового дрожания и показателей битовых ошибок для электрических интерфейсов.

Внедрение технологий передачи информации со спектральным уплотнением каналов CWDM и DWDM, а также увеличение скорости передачи данных в волоконно-оптических системах передачи информации

(ВОСП), приводят к необходимости контроля дисперсионных характеристик оптического волокна, а также фазового дрожания передаваемых информационных импульсов. Дисперсионные эффекты – поляризационная модовая дисперсия (ПМД) и хроматическая дисперсия (ХД) – обуславливают уширение оптического импульса во времени при прохождении через оптическую передающую среду, а фазовое дрожание – сдвиг импульса во времени. Эффект фазового дрожания присутствует в системах как с оптическими (ФДО), так и с электрическими (ФДЭ) интерфейсами. Указанные процессы уширения и сдвига информационных импульсов увеличивают число битовых ошибок и ведут к потере данных в высокоскоростных ВОСП. Для решения задачи измерений указанных параметров высокоскоростных ВОСП на территории РФ существуют более 20 типов средств измерений. В связи с этим для решения задач метрологического обеспечения измерений ХД, ПМД, ФДО и ФДЭ в ВС РФ в рамках ОКР «Индекс-ЦС» были созданы рабочие эталоны единиц поляризационной модовой дисперсии (РЭ ПМД), хроматической дисперсии (РЭ ХД), фазового дрожания и показателей битовых ошибок для оптических интерфейсов (РЭ ФДО), фазового дрожания и показателей битовых ошибок для электрических интерфейсов (РЭ ФДЭ).

Разработанный комплект рабочих эталонов предназначен для метрологического обеспечения вооружения и военной техники. По результатам Государственных испытаний разработанный комплект средств метрологического обеспечения цифровых систем передачи рекомендован к принятию на снабжение Вооружённых Сил Российской Федерации.

Определенный опыт и научно-технический задел также был использован при разработке специальных высокоточных систем контроля и диагностики несанкционированного доступа и неразрушающего съема информации в ВОСП (ОКР «Ключ-4-0» и ОКР «Ключ-5-0») проведенных в 2004-2006г. в интересах силовых ведомств России

В рамках реализации федеральной целевой программы (ФЦП) «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008 – 2011 годы» завершена работа по теме: «Создание комплекса высокоточных методов и средств измерений оптических характеристик наноструктурных фотонно-кристаллических волокон для перспективных высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи информации и оптоэлектроники». Актуальность и перспективность работы обусловлена тем, что в системах и элементах нанофотоники для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи информации, сенсорной техники и волоконно-оптической квантовой криптографии находят широкое применение специализированные наноструктурные фотонно- кристаллические световоды и элементы на основе фотонных кристаллов.

Создан комплекс аппаратуры для измерений основных параметров фотонно-кристаллических световодов: хроматической и поляризационно-модовой дисперсии и спектрального ослабления, а также методики калибровки и поверки средств измерений указанных параметров

После завершения испытаний аппаратура включена включены в Государственный реестр средств измерений. Выполненные разработки позволили создать нормативно-методическую и инструментальную базу обеспечения единства измерений спектрально-дисперсионных характеристик наноструктурных фотонно-кристаллических волокон в высокоскоростных и квантовых волоконно-оптических системах передачи информации и распределенных волоконно-оптических сенсорных системах диагностики.

В рамках реализации Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» начиная с 2013 года в рамках НИР «Частота» проводятся исследования возможности создания высокоточного канала передачи эталонных сигналов частоты по волоконно-оптической линии связи в интересах повышения стабильности и надёжности формирования шкалы времени системы «ГЛОНАСС». В частности, выполняются исследования влияния различных факторов на

неопределенность передачи единицы частоты в оптическом диапазоне по волокну. В рамках этих работ будут исследованы фазовые флуктуации частоты под воздействием смоделированных в лабораторных условиях различных факторов, включая температуру, давление, акустические шумы и переменные магнитные поля.

Основными задачами НИР «Частота» являются:

1) анализ, исследование и выбор оптимальных методов и технических средств обеспечивающих ослабление действия физических факторов приводящих к искажениям передаваемого по волоконно-оптическим линиям радиочастотного или оптического эталонного сигнала;

2) разработка технических предложений по различным вариантам реализации волоконно-оптических линий для решения задачи высокоточной передачи ЭСЧ и получение теоретических оценок ожидаемых его физических характеристик, а также надежности и устойчивости;

3) поиск и создание способов формирования и поддержания параметров передаваемых по волоконно-оптической линии ЭСЧ в пределах, необходимых для передачи на расстояния не менее 100 км с сохранением приемлемой точности.

4) реализация этих способов в виде экспериментальной аппаратуры и проведение исследований метрологических характеристик системы передачи единицы частоты;

5) создание и исследования оптимальных методов и технических средств высокоточной передачи ЭСЧ по волоконно-оптическим линиям от ГЭВЧ к ЦС;

6) проведение лабораторных испытаний макета комплекса средств передачи ЭСЧ по волоконно-оптическим линиям.

В результате выполнения НИР должен быть создан макет комплекса средств передачи ЭСЧ от водородных хранителей ГЭВЧ по волоконно-оптическим линиям на расстояние порядка 100 км - с погрешностью

передачи ЭСЧ меньшей $5 \cdot 10^{-16}$. Такие метрологические характеристики по точности передачи ЭСЧ на расстояние 100 км превосходят те, которые могут обеспечить как дуплексные спутниковые каналы, так и сличения, выполненные с помощью перевозимых квантовых часов.

В 2011-2013 г.г. были проведены работы по исследованию методов и средств воспроизведения и передачи единицы частоты оптического излучения для сверхскоростных волоконно-оптических систем передачи информации со спектральным уплотнением.

В рамках этих работ впервые в РФ определены пути построения системы метрологического обеспечения измерений частоты оптического диапазона для телекоммуникационных систем. Сформулированы предложения по созданию Государственного Первичного специального эталона частоты оптического диапазона. Создание такого эталона позволит гармонизировать систему метрологического обеспечения в данной области измерений с соответствующими системами ведущих зарубежных стран на основе стандартов МЭК,

В 2015г. завершаются работы по совершенствованию Государственного первичного специального эталона ГЭТ 90-85 с целью расширения его функциональных возможностей для метрологического обеспечения измерений динамических характеристик излучения в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи информации, включая единицу скорости передачи информации. . Была реализована система генерации эталонных сигналов в виде псевдослучайных последовательностей импульсно-модулированного оптического излучения, а также система восстановления их тактовой частоты. Это позволит реализовать эталонную аппаратуру для тактовых частот до 10 ГГц в формате синхронной цифровой иерархии , которую планируется включить в состав ГЭТ 90-85 для расширения его функциональных возможностей в части метрологического обеспечения измерений скорости передачи информации в оптических телекоммуникационных системах.

Эти работы позволят впервые создать на основе использования Государственного эталона и поверочной схемы по ГОСТ 8.198-85 систему метрологического обеспечения скорости передачи информации в волоконно-оптических трактах.

В заключение описываются проблемы дальнейшего развития системы метрологического обеспечения измерений в данной области. Среди них можно выделить вопросы обеспечения измерений характеристик цифровых оптических систем передачи информации (джиттер, временные характеристики и др.), измерений средней мощности сверхмалых уровней мощности оптического излучения, поиск путей создания средств и методов метрологического обеспечения для сверхскоростных волоконно-оптических систем передачи информации с комбинированной модуляцией со скоростями передачи до 100 Гбит в секунду и более, основ метрологического обеспечения распределенных волоконно-оптических датчиков с сенсорным волоконно-оптическим кабелем, а также необходимость расширения диапазонов воспроизведения и уменьшения погрешностей воспроизведения и передачи ряда перечисленных выше единиц. Рассматриваются также некоторые прикладные задачи, связанные с вопросами передачи единиц с использованием волоконно-оптических линий.

**ИЗМЕРЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ,
СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ
В БЛИЖНЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ И ВИДИМОМ ДИАПАЗОНАХ
СПЕКТРА**

**Никоненко С.В., Луценко Е.В., Данильчик А.В., Длугунович В.А.,
Ждановский В.А., Крейдич А.В., Липлянин А.А., Ржеуцкий М.В.**

Институт физики НАН Беларуси, г. Минск

В последнее время бурно развиваются новые области применения источников излучения ультрафиолетовой (УФ) области спектра, что обусловлено появлением компактных долговечных УФ светодиодов (СИД). Можно утверждать, что в ближайшие годы традиционные источники УФИ во многих приложениях будут заменены на СИД и лазерные диоды (ЛД).

Спектральное и пространственное распределения мощности излучения СИД, ЛД и традиционных источников УФИ существенно отличаются, поэтому стандартизованные методы измерений оптических характеристик их излучения не в полной мере приемлемы. Кроме того, хотя СИД и ЛД относятся к твердотельным источникам излучения (ТТИИ), существующие методы измерений оптических характеристик и параметров их излучения имеют существенные отличия. Так для измерений характеристик лазерного излучения (ЛИ) действует система стандартов ISO, которые в целом достаточно обоснованы, но в них не учитываются особенности излучения полупроводниковых лазеров, имеющих большую расходимость. Например, в стандартах ISO 13694, ISO 11146 и ISO 11554 методы измерений пространственных характеристик ЛИ применимы только для излучения с углом расходимости менее 30 мрад, в то время как углы расходимости излучения полупроводниковых лазеров составляют от 1° до 90°. Для СИД основным документом в международной метрологической практике, в котором определены фотометрические, радиометрические,

спектрорадиометрические и колориметрические величины, характеризующие их излучение и методы их измерений, являются рекомендации Международной комиссии по освещению CIE-127, согласно которым измерения оптических характеристик излучения СИД необходимо выполнять на относительно небольших расстояниях, хотя в этих условиях они не являются точечными источниками излучения. К тому же, как первичные, так и вторичные оптические компоненты СИД оказывают существенное влияние на пространственное и спектральное перераспределение излучения, соответственно универсальной геометрии измерений, применимой к большому числу типов СИД, не существует, и их корректное сравнение является проблемой. Попытка CIE разрешить проблему измерений большого числа типов СИД в отсутствие универсальной геометрии измерений, состоит в введении новой характеристики излучения СИД – усредненной силы света (усредненной энергетической силы излучения), которая определяется как сила света в стандартных условиях CIE A и B.

В 2010 – 2013 гг. в Институте физики НАН Беларуси с учетом рекомендаций ГОСТ ИСО 11554-2007 и CIE-127 был разработан и создан комплекс для измерений оптических характеристик ТТИИ в диапазоне от 200 до 900 нм. В комплексе для измерения фотометрических характеристик излучения СИД реализован детекторный подход. В этом случае усредненную силу света светодиода для стандартных условий CIE A (B), в канделах, можно определить по формуле:

$$I_{\text{LED A(B)}} = E_{\text{A(B)}} \cdot l_{\text{A(B)}}^2, \quad (1)$$

где $l_{\text{A(B)}}$ – расстояние, соответствующее стандартным условиям CIE A или B, м; $E_{\text{A(B)}}$ – освещенность, измеренная фотометром при стандартных условиях CIE A или B, лк. В CIE-127 фотометрические измерения рекомендовано выполнять в направлении механической оси СИД. Однако эта ось, как правило, не совпадает с оптической осью излучения СИД, что обусловлено пространственной неточностью посадки светодиодного кристалла и

дефектами первичной оптики СИД. Поэтому значения силы света, а также энергетической силы излучения, логично измерять по направлению оптической оси СИД, после определения пространственного распределения интенсивности излучения. Нами были проведены экспериментальные исследования пространственного распределения силы света различных СИД в двух взаимоперпендикулярных плоскостях. По результатам измерений установлено, что пространственное распределение силы света имеет неоднородный характер для всех типов СИД. В тоже время в узком угловом диапазоне, определяемом стандартными условиями СИЕ А или В сила света для большинства испытуемых образцов СИД слабо зависит от угла. Но даже в этих случаях, стандартные условия СИЕ А(В) не в полной мере характеризуют излучение с пространственным распределением, характерным для современных СИД, применяемых в светотехнических устройствах. Поэтому для объективной характеристики необходимо проводить измерение пространственного распределения силы света и энергетической силы излучения СИД и ЛД.

Для измерений пространственного распределения силы света I_{LEDV} нами применялся гониофотометрический метод. Данный метод также позволял при использовании калиброванного радиометра измерять и пространственное распределение плотности мощности излучения ЛД и СИД. Плотность мощности ЛД E_{σ} в этом случае рассчитывают по формуле

$$E_{\sigma} = \bar{P}/\sigma, \quad (2)$$

где \bar{P} – среднее значение мощности излучения, Вт; σ – площадь диафрагмы, м². Измерение пространственного распределения плотности мощности излучения ЛД с помощью такого метода является вполне оправданной процедурой, так как, несмотря на отсутствие рекомендаций в стандартах ISO, данные измерения де-факто применяются производителями ЛД и служат одной из важнейших характеристик для расчета вторичной оптики ЛД.

Для измерений спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО), создаваемой излучением СИД, согласно рекомендациям CIE-127, нами применялся метод замещения, используя эталонные лампы, калиброванные по СПЭО и спектрорадиометр. В этом случае СПЭО ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$) при длине волны λ рассчитывается по формуле

$$E_{e\lambda\text{LED}} = E_{e\lambda s} (Y_{e\lambda\text{LED}} / Y_{e\lambda s}), \quad (3)$$

где $E_{e\lambda s}$ – СПЭО эталонной лампы; $Y_{e\lambda\text{LED}}$ – измеренный сигнал при освещении испытуемым СИД; $Y_{e\lambda s}$ – измеренный сигнал при освещении эталонной лампой.

Для измерений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) излучения СИД в CIE-127 рекомендации ограничены только краткой фразой о необходимости «применять фотометр с изображающей оптикой». Но, так как размеры кристалла УФ СИД обычно не превышают 1 мм для формирования изображения необходимо использование УФ оптики с большим увеличением, не дающей при этом значительных спектральных и пространственных искажений. Поэтому мы применили нетрадиционный подход: так как ряд СИД изделий можно классифицировать как равномерный источник излучения, то усредненное значение СПЭЯ излучения испытуемого светодиода $L_{e\lambda\text{LED}}$ при длине волны λ , в $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{ср}^{-1}$, можно определить по формуле

$$L_{e\lambda\text{LED}} = (E_{e\lambda\text{LED}} \cdot l^2) / A_s \quad (4)$$

где $E_{e\lambda\text{LED}}$ – измеренное значение СПЭО, создаваемой светодиодом на расстоянии l между механическим центром апертурной диафрагмы, установленной перед светодиодом, и входной апертурной диафрагмой интегрирующей сферы; A_s – площадь светящейся области СИД или выходной апертурной диафрагмы, установленной перед светодиодом. Таким же

образом возможно измерение усредненного значения СПЭЯ излучения ЛД (по известному распределению в ближнем поле излучения), а также усредненного значения яркости излучения СИД и ЛД.

АХРОМАТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОРОНОГРАФ С ПЕРЕМЕННЫМ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ СДВИГОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕСОЛНЕЧНЫХ ПЛАНЕТ

П.Н. Фролов

Институт Космических Исследований РАН, Москва

В докладе схема ахроматического интерференционного коронографа (нуль-интерферометра) с переменным вращательным сдвигом для решения задачи обнаружения и исследования экзопланет (внесолнечных планет, обращающихся вокруг других звезд) и других слабоконтрастных астрономических объектов вблизи ярких источников. Прямое наблюдение и спектральный анализ изображений экзопланет – это сложная техническая задача из-за сочетания огромного яркостного контраста и малого углового расстояния между планетой и родительской звездой. Например, отношение интенсивностей излучения Солнца и Земли составляет около 6 порядков в инфракрасном диапазоне (длина волны более 10 мкм) и около 9 порядков в видимом и ближнем ИК диапазонах (0,35...1,5 мкм), при этом видимое угловое расстояние между Солнцем и Землей около 0.1 угловой секунды при наблюдении с расстояния 10 парсек (характерное расстояние до ближайших звезд). К настоящему времени предложено и разрабатывается много различных схем звездных коронографов (в том числе нуль-интерферометров) как в России, так и за рубежом. В наземных астрономических наблюдениях эффективность работы коронографа сильно ограничена из-за влияния турбулентной атмосферы Земли. Но уже сейчас коронографы начинают применяться на наземных телескопах для исследования окрестностей звезд, их протопланетных дисков, и детектирования экзопланет. Современные системы адаптивной оптики пока не могут компенсировать искажения волнового фронта, вызванные динамикой земной атмосферы, до уровня достаточного для наблюдения экзопланет земного типа, поэтому для устранения влияния атмосферы предполагается оснащать звездным

коронографом инструменты внеатмосферной астрономии: стратосферные и космические телескопы.

Доклад посвящен ахроматическому интерференционному коронографу с переменным вращательным сдвигом с теоретически достижимым контрастом 9 порядков (на длине волны 1 мкм). Настоящая схема может быть ахроматичной в широком диапазоне длин волн (например, одновременно в УФ, видимом и ближнем ИК: 0,22...2,3 мкм), а также механически стабильна (является модификацией интерферометра общего пути).

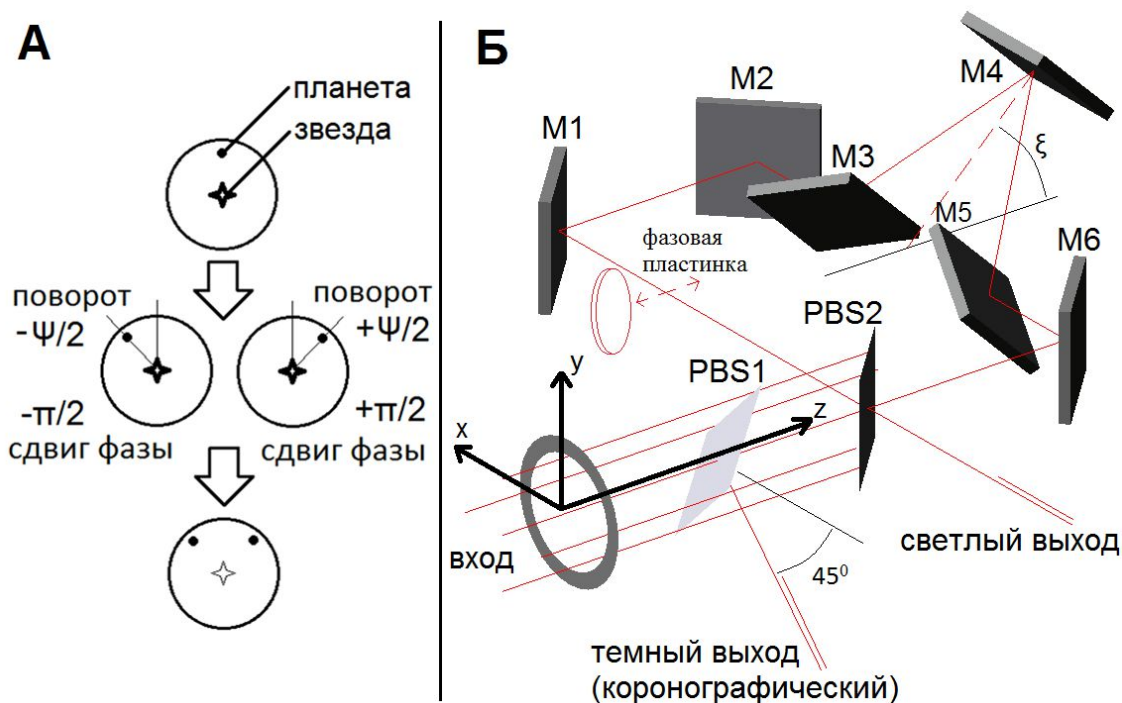


Рисунок 1. Принцип (А) и оптическая схема (Б) ахроматического интерференционного коронографа (нуль-интерферометра) с переменным вращательным сдвигом

Рисунок 1А иллюстрирует принцип погашения яркого осевого источника в схеме нуль-интерферометра общего пути с переменным вращательным сдвигом. Смоделированное или полученное телескопом изображение звезды и планеты коллимируют и направляют в нуль-интерферометр, где оно разделяется на два равных по интенсивности

изображения, которые сдвигаются по фазе на $\pm\pi/2$ радиан и одновременно поворачиваются на переменный угол $\psi/2$ в противоположных направлениях вокруг оптической оси. При совмещении изображений в результате интерференции в противофазе свет от звезды существенно ослабляется. Свет от двух копий изображения планеты ослабляется незначительно, так как копии оказываются геометрически разделёнными. На рисунке 1Б приведена соответствующая оптическая схема нуля-интерферометра. Исследована возможность включения в схему фазовой пластинки для увеличения пропускания при малых углах вращательного сдвига.

На лабораторном макете коронографа наблюдался эффект темного поля с использованием лазерного и белого света, чем экспериментально была подтверждена работоспособность и ахроматичность рассматриваемой схемы.

В интерференционном коронографе степень ослабления света звезды ограничена из-за ее конечного наблюдаемого углового размера, т.е. частичной пространственной когерентности источника света. Ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом позволяет подобрать оптимальное значение угла поворота при известных прочих параметрах для достижения максимального ослабления яркого осевого источника. При наблюдении звезды телескопом большего диаметра можно получить существенный выигрыш в погашении света осевого источника (более 2 порядков) при углах поворота около $5\dots 40^\circ$.

Схемы ахроматического интерференционного коронографа (нуль-интерферометра) запланированы для установки на космические телескопы “Планетный мониторинг” и “Звездный патруль”.

УСТАНОВКА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ФОТОПРИЕМНИКОВ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 0,25 – 14,0 мкм

Дунаев А.Ю., Крутиков В.Н., Морозова С.П., Саприцкий В.И.

Во ВНИИОФИ в рамках создания Государственного первичного эталона спектральной чувствительности фотоприемников разработана установка для воспроизведения и передачи единицы величины абсолютной и относительной спектральной чувствительности к потоку излучения в диапазоне длин волн от 0,25 до 14,00 мкм на основе прецизионного монохроматора и криогенного радиометра.

Функциональная схема установки представлена на рисунке 1.

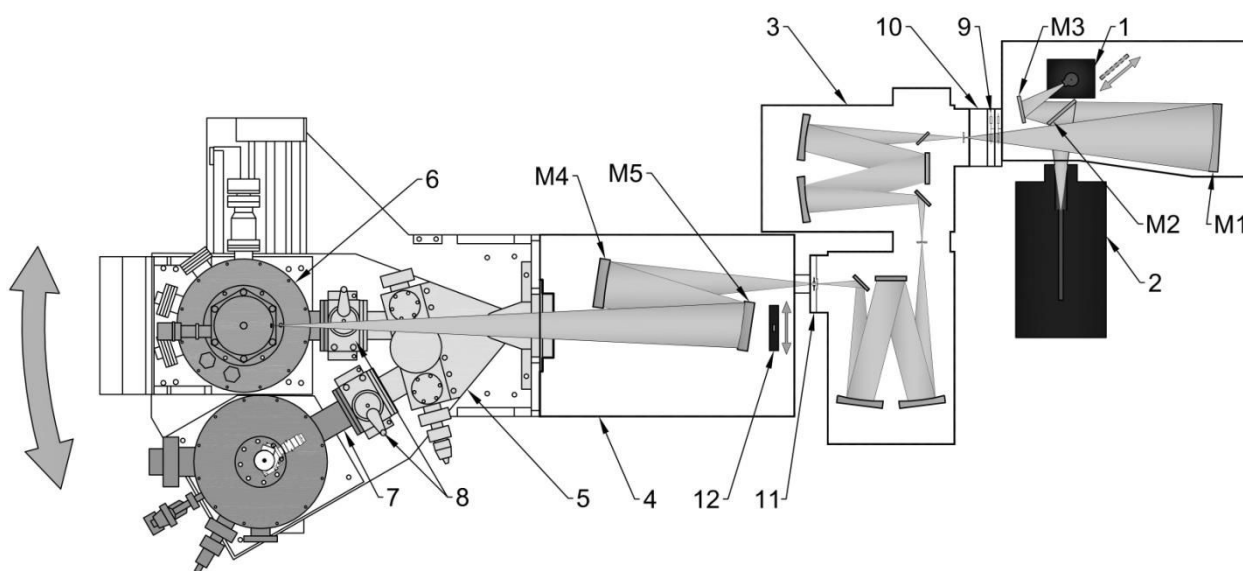


Рисунок 1. Функциональная схема установки. 1-галогенная лампа, 2-МЧТ 3400, 3-двойной монохроматор, 4-блок фокусирующей оптики в термостатированном корпусе, 5-общая вакуумная камера, 6-криогенный радиометр, 7-вакуумная камера приемников излучения, 8-шиберы, 9-блок фильтров, 10-заслонка, 11-узел сменных апертур, 12-модулятор, М1-сферическое зеркало, М2-плоское зеркало для МЧТ, М3-плоское зеркало для галогенной лампы, М4,М5-внеосевые параболические зеркала

В качестве источников излучения в установке используются осветитель на основе галогенной лампы, работающий в диапазоне длин волн от 0,25 до 2,5 мкм, и модель черного тела (МЧТ) при температуре 3400 К, работающая в диапазоне длин волн от 2,5 до 14,0 мкм. В осветителе расположены также спектральная лампа, с помощью которой осуществляется калибровка монохроматора по длинам волн, и лазер, который используется при настройке и юстировке элементов оптической схемы.

В качестве монохроматора используется двойной монохроматор Model 2035D фирмы «McPherson». Излучение от источника с помощью зеркал направляется на вход монохроматора, перед которым расположены узел управляемой компьютером заслонки и колеса с фильтрами.

После выходной щели монохроматора установлен узел сменных выходных апертур и модулятор. Излучение из выходной щели монохроматора, с помощью оптической системы, состоящей из двух внеосевых параболических зеркал, направляется на входное окно вакуумной камеры, формирующей общий вакуумный объем для радиометра и калибруемых приемников излучения с общим входным окном и двумя вакуумными затворами (8) на входе криогенного радиометра и вакуумной камеры приемников излучения.

Радиометр и вакуумная камера приемников излучения подсоединены к общей вакуумной камере с оптическим окном с помощью гибкого Y-образного сильфона, что позволяет направлять излучение с выхода монохроматора на вход криогенного радиометра или калибруемого фотоприемника и исключает необходимость измерений входного окна.

Криогенный радиометр представляет собой полостной неселективный приемник с электрическим замещением. Абсолютный криогенный радиометр представляет собой сложную криовакуумную и электронную систему, включающую систему вакуумирования внутреннего объема криостата радиометра, систему охлаждения и стабилизации температуры приемной полости и теплостока радиометра и систему измерения и обработки

информации.

Принцип работы радиометра с электрическим замещением основан на замещении оптической мощности, поглощенной приемной полостью, электрической мощностью. Сравнение оптической мощности с электрической производится при помощи нагрева приемной полости до одной температуры в оптической фазе и фазе замещения.

В оптической фазе: $T_{\text{опт.}} = S \cdot (P_{\text{эл.опт.}} + P_o(\lambda) + P_\phi)$, где $T_{\text{опт.}}$ - температура приемной полости [К], S - коэффициент преобразования приемной полости [К/Вт], $P_{\text{эл.опт.}}$ - электрическая мощность, подаваемая на обмотку замещения приемной полости в оптической фазе [Вт], $P_o(\lambda)$ - мощность измеряемого оптического потока излучения [Вт], P_ϕ - мощность фонового излучения, [Вт].

В фазе электрического замещения: $T_{\text{зам.}} = S \cdot (P_{\text{эл.зам.}} + P_\phi)$, где $P_{\text{эл.зам.}}$ - электрическая мощность, подаваемая на обмотку замещения приемной полости в электрической фазе [Вт].

$$T_{\text{опт.}} = T_{\text{зам.}}$$

$$P_o(\lambda) = P_{\text{эл.зам.}} - P_{\text{эл.опт.}}$$

Воспроизведение единицы величины спектральной чувствительности к потоку излучения состоит в измерении в спектральном интервале мощности излучения, поглощенного приемной полостью радиометра с последующим облучением этим излучением фотоприемника, измерением его сигнала и расчетом его спектральной чувствительности:

$$S_I(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P_o(\lambda)} \quad S_U(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{P_o(\lambda)}, \quad \text{где } S_I(\lambda) - \text{спектральная чувствительность}$$

приемника излучения, калибруемого по току [А/Вт], $S_U(\lambda)$ - спектральная чувствительность приемника излучения, калибруемая по напряжению [В/Вт],

$P_o(\lambda)$ - мощность излучения, измеренная криогенным радиометром [Вт],
 $I(\lambda)$ - ток калибруемого приемника излучения [А], $U(\lambda)$ - напряжение калибруемого приемника излучения [В].

Метрологические характеристики установки представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Спектральный диапазон	от 0,25 до 14 мкм
Динамический диапазон	$1 \cdot 10^{-6} \div 10$ А/Вт; $1 \div 1 \cdot 10^{16}$ В/Вт; 0,01 ÷ 1,00 отн.ед.
S_0	от $8,2 \cdot 10^{-4}$ до $1,8 \cdot 10^{-3}$
$\theta_{0,99}$	от $7,7 \cdot 10^{-4}$ до $4,5 \cdot 10^{-2}$
u_A	от $8,2 \cdot 10^{-4}$ до $1,8 \cdot 10^{-3}$
u_B	от $3,2 \cdot 10^{-4}$ до $1,9 \cdot 10^{-2}$
u_C	от $8,8 \cdot 10^{-4}$ до $1,9 \cdot 10^{-2}$
$U_{0,99} (k_{0,99} = 2,576)$	от $2,3 \cdot 10^{-3}$ до $4,9 \cdot 10^{-2}$

На установке были проведены сличения шкалы спектральной чувствительности трап-детекторов при использовании лазерного излучения на длине волны 0,633 мкм в качестве источника. Сходимость шкал спектральной чувствительности была в пределах 0,01%.

Список литературы

1. George P. Eppeldauer Spectral responsivity-based calibration of photometer and colorimeter standards // Journal of Modern Optics, 2013.
2. Evangelos Theocharous, The establishment of the NPL infrared relative spectral responsivity scale using cavity pyroelectric detectors// Metrologia. – 2006. - №43. – S. 115-S. 119.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЛИЧЕНИЙ ВТОРИЧНЫХ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НАПРАВЛЕННОГО ПРОПУСКАНИЯ С ГОСУДАРСТВЕННЫМ ПЕРВИЧНЫМ ЭТАЛОНОМ ГЭТ 156-91

А.А. Катышева, Б.Е. Лисянский, С.П. Морозова, М.А. Солодилова

Единство измерений спектральных коэффициентов направленного пропускания (СКНП) в России осуществляется путем периодических сличений вторичных эталонов с Государственным первичным эталоном единиц спектральных коэффициентов направленного пропускания в диапазоне длин волн $0.2 \div 50.0$ мкм, диффузного и зеркального отражений в диапазоне длин волн $0.2 \div 2.5$ мкм ГЭТ 156-91. В сличениях регулярно участвуют ФГУП ВНИИМ, ФБУ «Тест С.-Петербург», ФБУ «Челябинский ЦСМ», ФБУ «Тюменский ЦСМ», ФБУ «Красноярский ЦСМ», ФБУ «Ростовский ЦСМ» и ФБУ «Нижегородский ЦСМ».

В данной работе были рассмотрены результаты сличений ряда вторичных эталонов СКНП с использованием стабильных наборов светофильтров, входящих в состав ГЭТ 156-91.

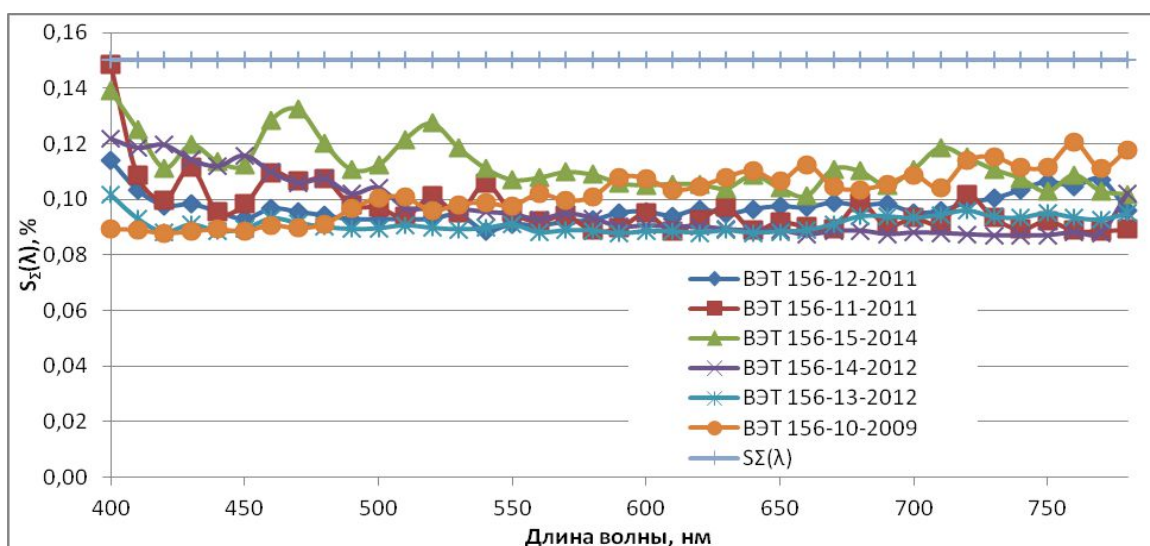


Рисунок 1. Суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения СКНП вторичными эталонами в видимой области спектра на уровне пропускания порядка 70 %.

Как видно из рисунка 1, суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения СКНП вторичными эталонами в видимой области не превышает 0,15 %.

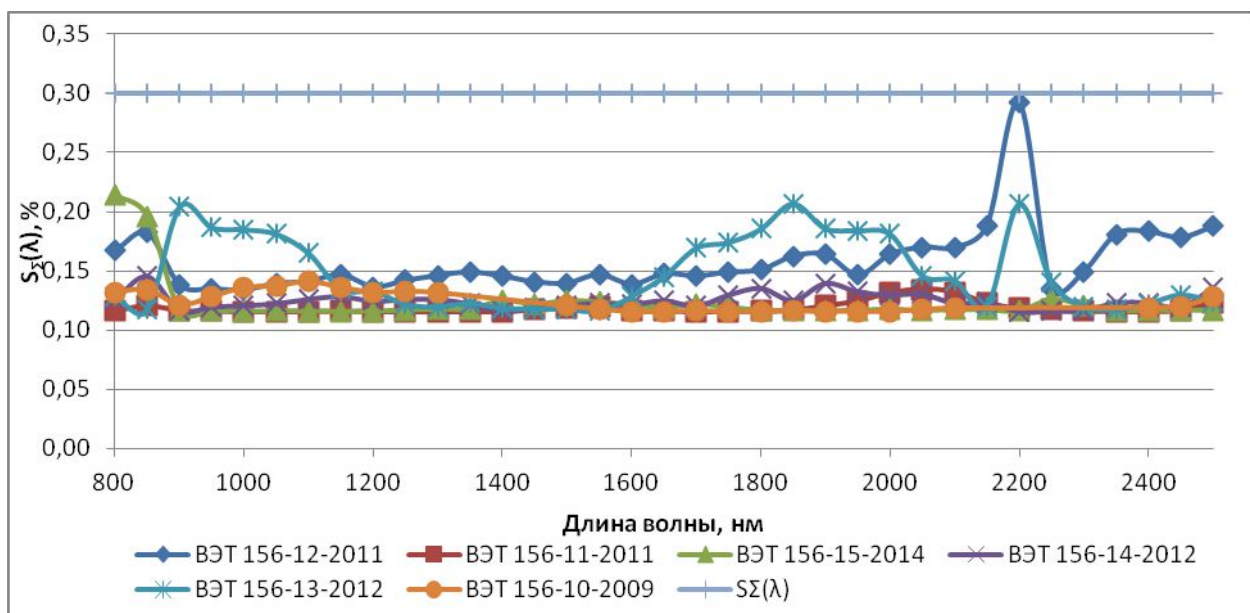


Рисунок 2. Суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения СКНП вторичными эталонами в ближней ИК области спектра на уровне пропускания порядка 90 %.

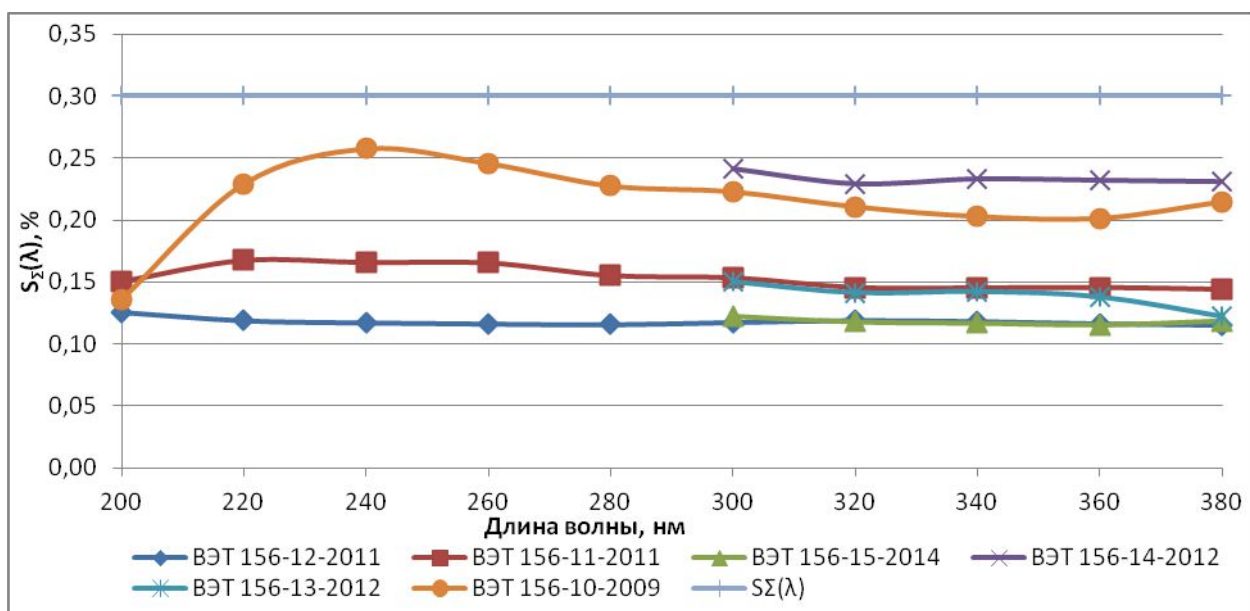


Рисунок 3. Суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения СКНП вторичными эталонами в УФ области спектра на уровне пропускания порядка 50 %.

Суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения СКНП вторичными эталонами в УФ и ближней ИК области не превышает 0,3 % (рисунки 2 и 3).

На рисунке 4 приведены результаты измерения отклонения установки длины волны для ряда вторичных эталонов полученных с использованием тонкоструктурного абсорбционного светофильтра ТАС-1. Как видно из приведенной диаграммы, на всех эталонах хорошо воспроизводятся линии поглощения, расположенные в УФ и видимой областях спектра. Однако две последние линии (22.1 и 22.7 в соответствии с паспортом ТАС-1) имеют достаточно большой разброс. Это связано с тем, что они имеют большую ширину.

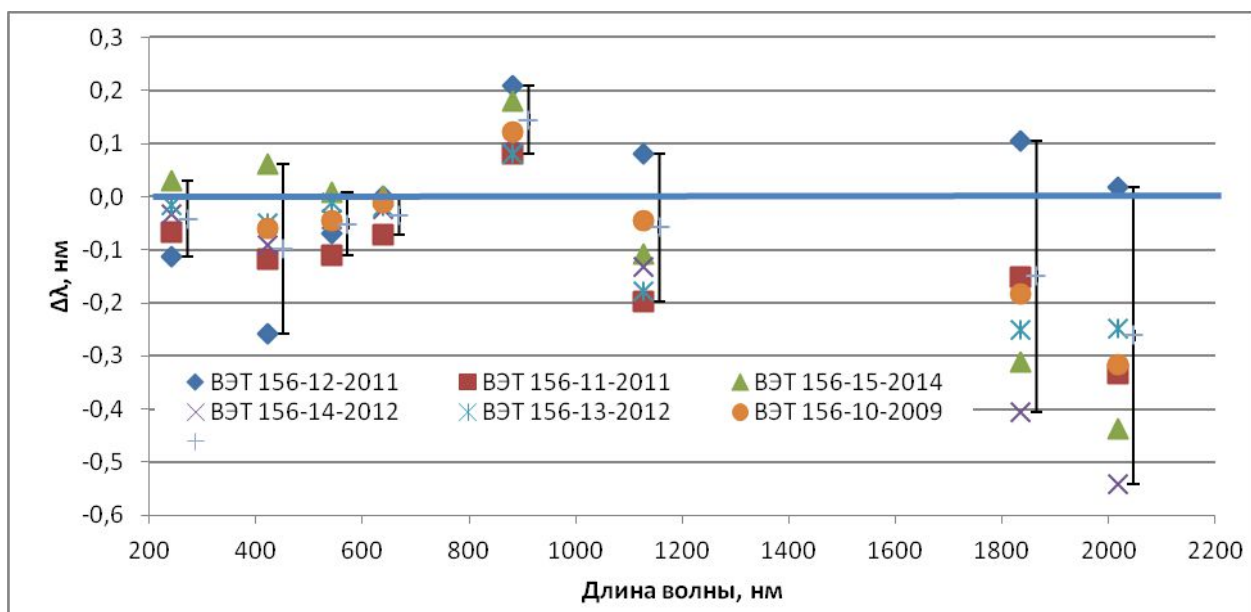


Рисунок 4. Результаты измерения отклонения установки длины волны для вторичных эталонов.

Результаты наблюдений за несколько лет на различных приборах показали необходимость изменить положение двух линий максимума поглощения для светофильтра ТАС-1 по сравнению с паспортным значением. Так положение линии 22.1 по паспорту составлявшее 1834,76 нм было изменено на 1834,3, а положение линии 22.7 (2016,94 нм) на 2016,54 нм.

Результаты ежегодных сличений вторичных эталонов с ГЭТ 156-91

показывают, что в видимой области спектра погрешность при передаче единицы величины СКНП соответствуют существующей поверочной схеме. Что касается измерений в УФ и ближней ИК области спектра, то в силу отсутствия высокостабильных мер, требуется корректировка существующей поверочной схемы.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДИОДЫ С КВАЗИГАУССОВОЙ ФОРМОЙ СПЕКТРА

Е.В.Андреева^а, С.Н.Ильченко^а, Ю.О.Костин^а, М.А.Ладугин^б, П.И.Лапин^а,
А.А.Мармалюк^б, С.Д.Якубович^с

^а ООО «Оптон», Москва; ^б ОАО «НИИ «ПОЛЮС» им. М.Ф.Стельмаха,
Москва; ^в МГТУ МИРЭА, Москва

Аннотация

Экспериментально исследованы квантоворазмерные суперлюминесцентные диоды (СЛД) с экстремально тонкими активными слоями состава (AlGa)As и (InGa)As и центральными длинами волн около 810 нм, 840 нм, 860 нм и 880 нм. Их спектр излучения имеет форму, близкую к гауссовой, а его полуширина составляет 30-60 нм в зависимости от длины активного канала и уровня накачки. В непрерывном режиме инжекции мощность светоизлучающих модулей на основе этих СЛД может составлять 1.0-25 мВт на выходе одномодового волоконного световода (ОВС). Продемонстрирован достаточно высокий срок службы этих приборов, превышающий 30000 часов. На их основе реализованы прототипы комбинированных источников света серии BroadLighter с колоколообразной формой спектра шириной до 100 нм.

Ключевые слова: наногетероструктура, квантоворазмерный суперлюминесцентный диод, оптическая когерентная томография.

Введение

В квантоворазмерных СЛД со сверхтонкими активными слоями в единицы нм возбужденная подзона смещается в область высоких энергий. При этом возбужденная подзона не заполняется и спектр суперлюминесценции определяется квантовыми переходами только из основной подзоны. Форма спектра таких СЛД близка к гауссовой, а его ширина может превышать 60 нм. Настоящая работа посвящена исследованию

источников света на основе СЛД указанного типа, которые представляют большой интерес для оптической когерентной томографии (ОКТ) [1].

Экспериментальные результаты

На Рис.1 изображены типичные Вт-А характеристики и зависимости полуширины спектра излучения от тока инжекции «объемного» и одного из квантоворазмерных СЛД, исследованных в данной работе. Образцы имеют абсолютно одинаковые конструкции и составы гетерослоев за исключением активного слоя. Их спектры суперлюминесценции разительно отличаются как по ширине, так и по характеру ее зависимости от уровня накачки. Форма спектра обоих образцов близка к гауссовой.

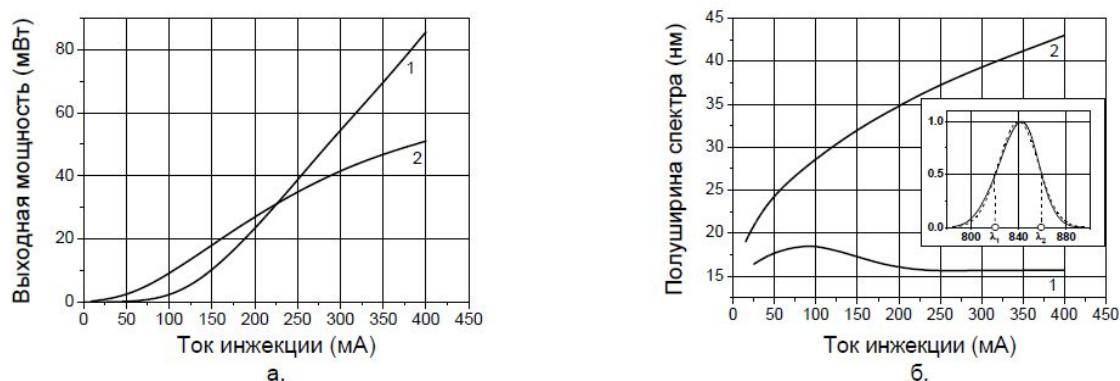


Рис.1 Типичные Вт-А характеристики (а) и зависимости полуширины спектра от тока инжекции (б) «объемного» (1) и квантоворазмерного (2) СЛД. На врезке – аппроксимация спектра квантоворазмерного СЛД функцией Гаусса.

В рамках данной работы была выращена серия однотипных наногетероструктур с различными толщинами активных слоев, в которых за счет изменения химического состава твердого раствора (концентраций In и Ga) величина медианной длины волны λ_m поддерживалась вблизи значения 840 нм (наиболее популярной для ОКТ-систем). Были измерены величины выходной мощности и полуширины спектра для СЛД с различными длинами активного канала, изготовленных из этих гетероструктур, при различных рабочих плотностях тока инжекции. Главный полученный результат – это

очень слабая зависимость основных параметров СЛД от толщины активного слоя d_a . При серийном выпуске рассматриваемых приборов предполагается остановиться на величине d_a около 6,0 нм.

Изменение химического состава активного слоя наногетероструктуры при его постоянной толщине позволяет изменять в широких пределах величину λ_m изготавливаемых СЛД. Были исследованы четыре типа СЛД с центральными длинами волн в диапазоне 800-900 нм, ширина спектра достигала 60 нм. Проведенные ресурсные испытания продемонстрировали достаточно высокую надежность разработанных СЛД.

Новые комбинированные источники света

Наряду со светоизлучающими СЛД-модулями в ОКТ-системах и в оптической метрологии распространены комбинированные источники света [2].

Как известно, суперпозиция 2-х смещенных спектров гауссовой формы, близких по полуширине, позволяет при определенных условиях получить спектр колоколообразной формы, полуширина которого близка к сумме полуширин слагаемых спектров. Именно такой подход был использован при исследовании прототипов новых двухканальных комбинированных источников света на основе разработанных СЛД-модулей с выводом излучения через ОВС. На Рис.2 представлены спектры излучения и автокорреляционная функция (АКФ) наиболее популярного прибора модели D-840-HP и новой модели D-860-G.

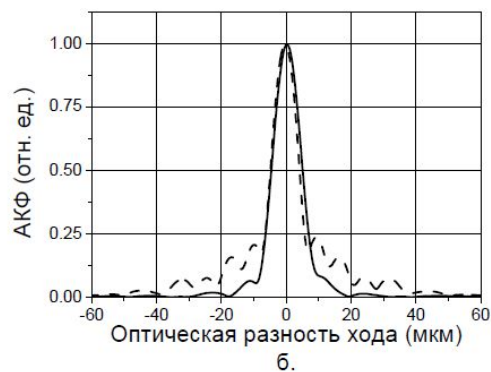
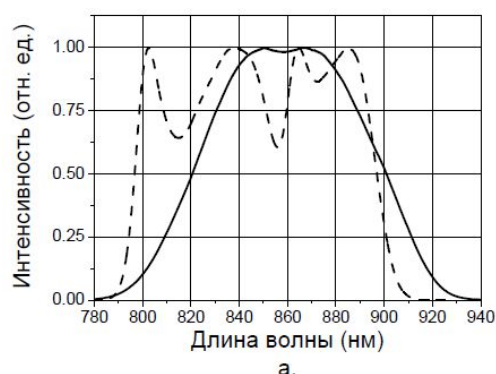


Рис.2 Спектры выходного излучения (а) и центральные пики АКФ (б) серийного источника BroadLighter D-840 (пунктир) и новой модели (предварительно – D-860-G).

Ширина спектра прибора варьируется от 65 нм до рекордного значения в 100 нм в зависимости от использованных СЛД. Есть все основания полагать, что для ОКТ-систем новый прибор окажется предпочтительным.

Заключение

Проведены исследования и разработка СЛД-модулей спектрального диапазона 800–900 нм на основе наногетероструктур с толщиной активного слоя в единицы нм. Исследованы прототипы новых широкополосных комбинированных источников света с колоколообразной формой спектра.

Список литературы

1. W.Drexler, J.G.Fujimoto, Optical coherence tomography, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008).
2. Т.Н. Ко, D.C. Adler, J.G. Fujimoto, D.S. Mamedov, V.V. Prokhorov, V.R. Shidlovski, and S.D. Yakubovich, Optics Express, 12 (10), 2112-2119 (2004).

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ УРОВНЕЙ

Т.Б. Горшкова, Е.А. Ивашин, Г.Н. Толстых, С.С. Широков

Световые измерения необходимы практически во всех отраслях промышленности. Требования науки и практики по точности измерений световых величин существенным образом влияют на уровень разработок образцов новой техники, качество выпускаемой светотехнической продукции. Измерение световых величин играет важную роль и при обеспечении безопасных условий труда и быта.

Система метрологического обеспечения световых величин требует постоянного совершенствования в связи с растущими требованиями науки и промышленности к точности и диапазону их измерений. Так, например, для обеспечения защитных функций национальной валюты необходимо измерение яркости люминесцирующих объектов интенсивностью менее 1 кд/м^2 , для чего необходимо воспроизводить малые уровни силы света. Для сертификационных испытаний знаков пожарной безопасности необходимо проводить измерения яркости в диапазоне от 10^{-4} кд/м^2 .

Уровни природной освещенности колеблются в весьма больших пределах – от 0,25 лк в ясную лунную ночь, до 100000 лк в ясный солнечный день. В предвечерние часы внешняя освещенность снижается до 100 лк и меньше, в сумерки – до 5-10 лк. Минимальная освещенность, при которой человек способен различать предметы составляет 0,0007-0,0008 лк.

В настоящее время приборы ночного видения (ПНВ) и низкоуровневые телевизионные системы (НТВС) нашли широкое применение в различных областях хозяйственной деятельности, науки и техники, в том числе сферах обеспечения обороноспособности страны, противодействия террористической угрозе, прогнозирования чрезвычайных ситуаций, включая экологический мониторинг, и многих других. Поэтому к современным ПНВ

и НТВС предъявляются достаточно жесткие требования по широте динамического диапазона работы по освещенности (таблица 1).

Таблица 1. Высокочувствительные телевизионные камеры класса «день/ночь» (по данным проспектов фирм)

Страна/фирма	Модель	Рабочая освещенность, лк
РФ, ФНПЦ «НПО Геофизика-НВ»	ГЕО-НТК4	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^4$
РФ, ФНПЦ «НПО Геофизика-НВ»	ГЕО-НТК5	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^4$
РФ, ОАО ЦНИИ «Циклон»	Циклон- DN/CCD-1,2	$10^{-4} - 10^3$
РФ, ОАО ЦНИИ «Циклон»	«Кречет»	Круглосуточн.

Для обеспечения единства измерений фотометрических характеристик малых уровней был разработан «Государственный первичный эталон единиц силы света малых уровней в диапазоне $10^{-6} - 10$ кд».

Государственный первичный эталон состоит из комплекса следующих средств измерений и вспомогательных устройств:

- эталонный источник силы света малых уровней на основе модели черного тела (МЧТ) и системы ослабления сигнала на основе интегрирующих сфер;

- набор источников силы света малых уровней, перекрывающих диапазон $10^{-6} - 10$ кд;

- набор прецизионных приемников излучения малых уровней, включая фотометры и спектрометрические приемники;

- установка для измерения линейности приемников излучения.

На рис. 1, 2 представлены внешний вид и структурная схема установки для воспроизведения единицы силы света малых уровней.



Рисунок 1. Внешний вид установки ГПЭ для воспроизведения единицы силы света малых уровней.

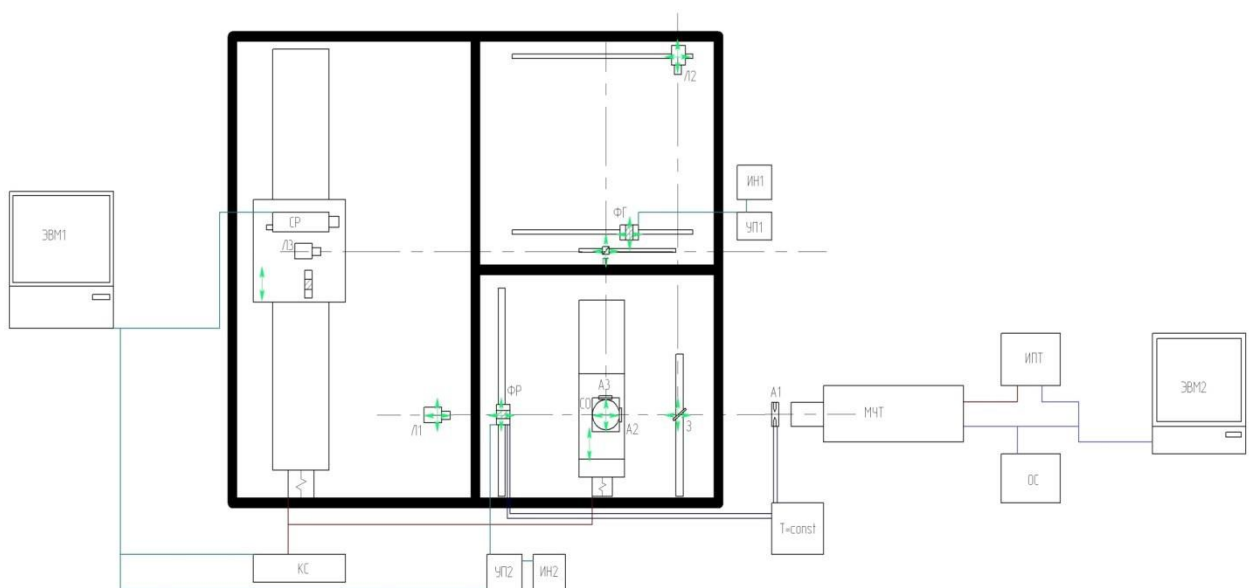


Рисунок 3. Структурная схема установки ГПЭ для воспроизведения единицы силы света малых уровней.

В качестве оптических ослабителей использованы диффузные ослабители, представляющие собой интегрирующую сферу диаметром 62 мм, покрытую сернокислым барием (рис. 3).

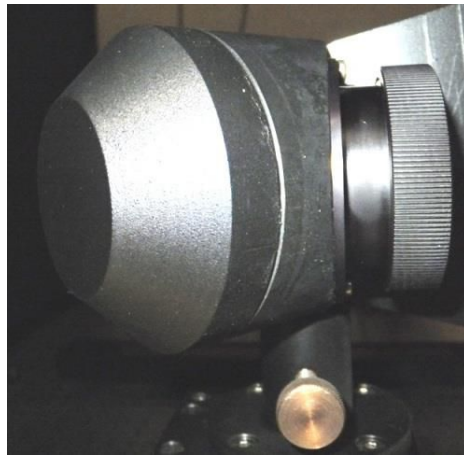


Рисунок 3. Общий вид интегрирующей сферы.

Каждая интегрирующая сфера ослабляет сигнал в 100-1000 раз в зависимости от диаметра входных и выходных апертурных диафрагм. Спектральный коэффициент ослабления каждой сферы определялся экспериментально. Для этого в нее заводилось излучение с известным абсолютным спектральным распределением, и на выходе из сферы измерялся сигнал с помощью калиброванного спектрометра. Затем вычислялся спектральный коэффициент ослабления сферы по формуле:

$$\tau_{сф} = \frac{\rho \frac{q_{\Sigma}}{Q}}{1 - \rho(1 - \frac{q_{\Sigma}}{Q})} \quad (1)$$

где ρ - коэффициент диффузного отражения материала стенок полости;
 Q - полная площадь внутренней поверхности полости, включая и отверстия;

q_{Σ} – суммарная площадь отверстий в полости.

Суммарный коэффициент ослабления вычислялся по формуле:

$$\tau(\lambda) = \prod_{i=1}^n \tau_i(\lambda), \quad (2)$$

где $\tau_i(\lambda)$ – спектральный коэффициент ослабления каждой сферы.

Оценка расширенной неопределенности результата воспроизведения коэффициента преобразования первичного фотометра при доверительной вероятности $P = 0.99$ рассчитывается по формуле (3):

$$\hat{U}_{P,S_v} = k \cdot \hat{u}_C(S_v), \quad (3)$$

где $k=3$ - коэффициент охвата.

Таблица 2 Значения неопределенностей воспроизведения единицы силы света малых уровней в зависимости от диапазона.

Обозначение неопределенности	Диапазон измерений, кд		
	10	10^{-3}	10^{-6}
$\hat{u}_A(S_v)$	0,41	0,42	0,59
$\hat{u}_B(S_v)$	0,21	0,30	0,36
$\hat{u}_C(S_v)$	0,46	0,52	0,69
\hat{U}_{P,S_v}	1,38	1,56	2,07

Сопоставление первичного эталона проводилось с аналогичными эталонами, используемыми в ведущих метрологических институтах: NIST (США), РТВ (Германия). Измерение силы света осуществляется методом, аналогичным применяемому во ФГУП «ВНИИОФИ».

Следует отметить, что установка в NPL (Великобритания) позволяет измерять силу света в диапазоне от 1 до 1000 кд.

В Таблице 12 приведено сравнение расширенной неопределенности разработанного во ФГУП «ВНИИОФИ» первичного эталона с расширенными неопределенностями аналогичных установок NIST и РТВ.

Таблица 3 Сравнение эталона с зарубежными аналогами.

	ВНИИОФИ, коэффициент охвата $k=3$			NIST*	PTB*
Диапазон измерений силы света, кд	10	10^{-3}	10^{-6}	$10^{-3}-1$	$10^{-3}-1$
Значения расширенной неопределенности в зависимости от диапазона измерений, %	1,38	1,56	2,07	0,5-1,5*	0,4-1,5*

* расширенная неопределенность вычислялась при коэффициенте охвата $k=2$ и доверительной вероятности $P = 0,95$.

Как видно из таблицы 3, разработанный во ФГУП «ВНИИОФИ» Государственный первичный эталон единицы силы света малых уровней в диапазоне 10^{-6} – 10 кд по своим метрологическим характеристикам, с учетом более широкого диапазона измерений и коэффициента охвата, не уступает соответствующим зарубежным аналогам.

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА
ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ УРОВНЕЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ МАКЕТИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ
ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДАЛЬНОМЕРА**

С.И. Пырикова

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево

На стадиях разработки, макетирования и юстировки отдельных узлов и систем лазерных оптико-электронных приборов (ОЭП) специалисты подвергаются опасному воздействию лазерного излучения. Требования по лазерной безопасности в России нормируются государственными стандартами и СНиП 5804-91 [1,2], в США - ANSIz 136.

Оценка воздействия лазерного излучения на организм человека предусматривает определение класса опасности лазеров и предельно допустимых уровней (ПДУ) лазерного излучения для четырех спектральных диапазонов с учетом зависимостей коэффициентов поглощения биотканей от длины волны.

Исследования воздействия лазерного излучения на живые системы давно и успешно развиты в России. Принятие на вооружение армии США лазерных дальномеров стимулировало и интенсифицировало развитие исследований, так как оказалось, что их излучение оказывает негативное действие на кожные покровы, центральную нервную систему, вызывает нарушение зрительных функций.

Глаз является уникальным селективным приемником света, способным реагировать на электромагнитные волны 0,40-0,76 мкм. Чувствительность глаза к различным длинам волн характеризуется кривой видности, адаптированной к дневной яркости, с максимумом 0,5550 мкм, условно принимаемой за единицу. Разрешающая способность глаза определяется согласующимися размерами светочувствительных элементов сетчатки и структурой дифракционного изображения светящихся точек. Обеспечение

защиты органов зрения при работе с лазерными источниками излучения регламентируют специальные стандарты на средства индивидуальной защиты в зависимости от целевой функции выполняемых работ.

Целью работы является создание алгоритма и программы расчета ПДУ для лазеров 3-го класса опасности видимого и ближнего инфракрасного(ИК) диапазонов.

Разработка, макетирование и юстировка лазерных опико-электронных приборов предполагают взаимодействие специалистов с прямым, зеркальным и диффузно-отраженным лазерным излучением в стационарных и полевых условиях.

В современных высокоточных дальномерах для целей наведения и измерения применяются лазеры видимого и ИК-диапазонов, первого и второго классов опасности. На стадии разработки ОЭП могут использоваться лазеры третьего класса опасности. По стандарту ANSIz существует 11 специальных мер безопасности, в том числе, защита глаз, специальное помещение, ограничение пути луча, обучение персонала и предупредительные надписи и др.

Для расчета предельно допустимых уровней лазерного излучения важно учитывать уровень освещенности или фона (день, ночь, сумерки).

Нормируемыми параметрами лазерного излучения являются энергетическая экспозиция H и облученность E , также энергия W и мощность P излучения усредненные по ограничивающей апертуре. Параметры связаны соотношениями:

$$H_{пду} = \frac{W_{пду}}{S_a}, \quad (1)$$

где $H_{пду}$ – предельно допустимое значение энергетической экспозиции;

$W_{пду}$ - предельно допустимое значение энергии, Дж;

S_a – площадь апертуры, m^2

$$E_{пду} = \frac{P_{пду}}{S_a}, \quad (2)$$

где $E_{\text{пду}}$ – предельно допустимое значение облученности;

S_a – площадь апертуры, м^2 ;

$P_{\text{пду}}$ - предельно допустимое значение мощности, Вт.

Выбор защитных фильтров производится по длине волны лазерного излучения и оптической плотности светофильтра (3,4)

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{H_{\text{max}}(E_{\text{max}})}{H_{\text{пду}}(E_{\text{пду}})}, \quad (3)$$

или

$$D_{\lambda} \geq \lg \frac{W_{\text{max}}(P_{\text{max}})}{W_{\text{пду}}(P_{\text{пду}})}, \quad (4)$$

H_{max} , E_{max} , W_{max} , P_{max} – максимальные значения энергетических параметров лазерного излучения в рабочей зоне,

$H_{\text{пду}}$, $E_{\text{пду}}$, $W_{\text{пду}}$, $P_{\text{пду}}$ – предельно допустимые уровни энергетических параметров при хроническом облучении.

В докладе будет представлено описание, алгоритм и программа расчета ПДУ лазерного излучения; результаты работы программы на примерах расчета ПДУ и выбора индивидуальных защитных фильтров для импульсных и непрерывных лазеров 3-го класса опасности.

Список литературы

1. СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

2. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. – М.: Стандартинформ, 2013

3. Б.И. Чигирев. Биофизика органов чувств.-Учебное пособие-Л.: СПбГЭТУ ЛЭТИ,2001.

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕРХМАЛОЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
КАМЕРЫ В РЕЖИМЕ СЧЁТА ФОТОНОВ**

М.В. Канзюба, А.Б. Берлизов, Г.Г. Фельдман

ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва

Рассмотрен метод измерения энергии импульсного монохроматического излучения сверхмалой интенсивности, основанный на регистрации отдельных фотонов с помощью электронно-оптической камеры. Для данного метода выполнена оценка неопределённости измерений энергии оптических импульсов. Кроме того, метод позволяет измерять пространственное распределение энергии по сечению пучка.

Метод счёта фотонов позволяет измерять энергетические характеристики излучения сверхмалой интенсивности, что актуально для таких приложений как лазерное зондирование, низкоэнергетические методы неразрушающего контроля, космические исследования, спектроскопия, а также квантово-оптических приложений, где требуется информация о статистике фотонов.

Для измерения энергетических характеристик импульсного монохроматического излучения сверхмалой интенсивности и длительности в режиме счёта фотонов предлагается использовать электронно-оптическую камеру (ЭОК), основным элементом которой является электронно-оптический преобразователь (ЭОП). В ЭОП двумерное оптическое изображение преобразуется на фотокатоде в электронное и переносится электронно-оптической системой на люминесцентный экран, где происходит обратное преобразование электронного изображения в оптическое, которое регистрируется с помощью матричного фотоприёмника (ПЗС-матрицы). В отличие от других типов детекторов, применяемых для счёта фотонов, таких как фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или лавинные фотодиоды, ЭОК

позволяет получать информацию о пространственном распределении энергии в пучке. Кроме того, ЭОК обладает низким уровнем собственных шумов и высоким быстродействием.

Получаемые с помощью ЭОК кадры представляют собой двумерную картину распределения вспышек на люминесцентном экране, которая соответствует распределению фотонов в излучении, падающем на фотокатод ЭОК. Автоматический подсчёт и определение координат вспышек в каждом кадре производятся с помощью созданной для этой цели компьютерной программы. Обработав таким образом достаточное количество кадров, можно исследовать статистику фотонов и находить среднее значение энергии импульсов лазерного излучения и её распределение по сечению пучка.

Энергия импульса монохроматического излучения находится по формуле

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \frac{M}{\eta}, \quad (1)$$

где Q — энергия импульса монохроматического излучения, λ — длина волны излучения в вакууме, M — число зарегистрированных вспышек на экране ЭОК, η — квантовая эффективность детектирования (КЭД) ЭОК, h — постоянная Планка, c — скорость света в вакууме. Для применения формулы (1) необходимо знать КЭД ЭОК на длине волны измеряемого излучения. Для этого прибор должен быть откалиброван с использованием эталонного источника излучения. Возможна также безэталонная калибровка при помощи бифотонного излучения, возникающего в результате спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света в нелинейном кристалле. Процедура калибровки ЭОК при помощи СПР аналогична соответствующей процедуре для ФЭУ, описанной в [1].

Проведённый анализ источников неопределённости измерений показал, что с помощью ЭОК, которая содержит ЭОП с одной микроканальной пластиной (МКП) и дополнительный ЭОП — усилитель яркости, в режиме счёта фотонов можно измерять энергию монохроматического излучения в

диапазоне $(1-100) \cdot 10^{-18}$ Дж с неопределённостью менее 15 % (для доверительного интервала 0,95). Неопределённость измерений может быть уменьшена при использовании ЭОП с двумя МКП.

Помимо определения средней энергии лазерных импульсов, ЭОК в режиме счёта фотонов позволяет исследовать распределение энергии по сечению пучка. Для этого с помощью специально разработанной компьютерной программы определяются координаты зарегистрированных вспышек в кадре ЭОК. В результате обработки массива кадров получается картина распределения энергии, подобная показанной на рис. 1а. Распределение на рис. 1а представляет собой изображение входной диафрагмы на фотокатоде ЭОК. Преимущество данного метода определения пространственного распределения энергии по сравнению с суммированием интенсивности измеренных кадров, результат которого показан на рис. 1б, состоит в полном устранении шумов ПЗС-матрицы, что особенно важно при исследовании излучения сверхмалой интенсивности.

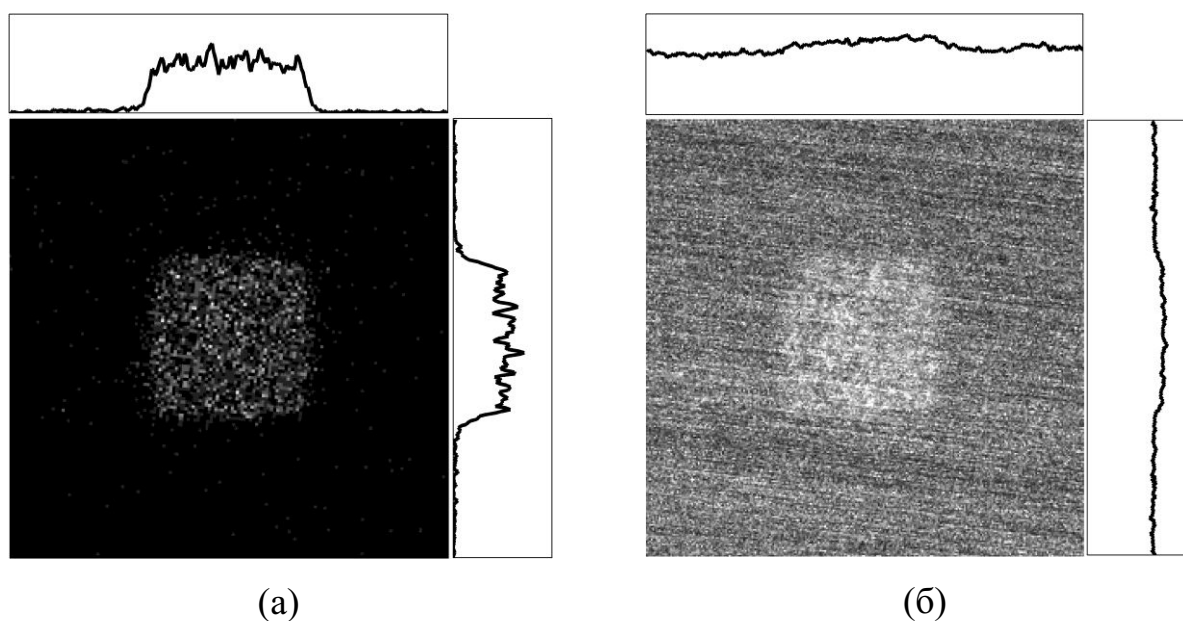


Рис. 1. а) Рассчитанное по 1000 кадрам распределение положений вспышек, усреднённое по ячейкам 4×4 пикселя. б) Распределение интенсивности в кадре ЭОК, полученное суммированием 1000 кадров.

Список литературы

1. Д.Н. Клышко, А.Н. Пенин. УФН 1987, т. 152 № 4, с. 653–665.

ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ЛАЗЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С МОЩНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ЛАЗЕРАМИ

НТО «ИРЭ-ПОЛЮС».

О.Б.Бибик к.т.н., С.Д.Ворончук к.т.н., К.В.Канаев инж.

ООО «НТО ИРЭ-Полюс», г.Фрязино, Московская обл.

Стремительный прогресс при разработке и развертывании серийного выпуска мощных (до 100 киловатт) волоконных лазеров заложил основу их широкого применения, в том числе, для различных технологических процессов, в которых расширяется применение лазеров – резки, сварки, наплавки, локальной термообработки и др. При этом, наряду с решением сложных аппаратных и технологических задач, возникает и ряд важных проблем метрологического характера, а также проблема обеспечения лазерной безопасности при работе с высокомоощными лазерами.

Метрологическая проблема заключается в отсутствии отечественной материальной базы для измерения технологически важных параметров мощных волоконных лазеров (мощности, параметров качества лазерного излучения и др.) с соблюдением всех Российских правовых норм. Нет эталонов, поверочных схем, наконец, самой отечественной измерительной техники. Поэтому НТО «ИРЭ-Полюс» вынужден использовать зарубежные измерительные приборы, но остаётся проблема их своевременной поверки.

Необходимо отметить также недостаток нормативно-технической документации по оценке характеристик мощных технологических (в том числе ,волоконных) лазеров, определяющих их технологические и, в некотором смысле, потребительские свойства.

В качестве отдельной проблемы, также имеющей отношение к метрологии, хотелось бы выделить контроль лазерной безопасности (ЛБ) при значительно возросшей мощности технологических лазеров.

Здесь также проявляются отсутствие современной отечественной измерительной базы и внятных методик. Особая актуальность этой проблемы состоит в том, что НТО «ИРЭ-Полус» широко оснащает своим оборудованием специализированные региональные инжиниринговые центры и высшие учебные заведения.

В настоящем докладе представлены результаты измерений в области ЛБ во время технологического процесса лазерной резки металла, с использованием серийно выпускаемого комплекса “LaserCut 3015”. Данный комплекс резки представляет собой 3-координатную систему портального типа на базе линейных синхронных двигателей с волоконным лазером мощностью до 10 кВт.

Для обеспечения защиты обслуживающего персонала от вредных производственных факторов, возникающих при лазерной резке, в первую очередь для защиты от воздействия со стороны отражённого и рассеянного лазерного излучения с длиной волны 1,07 мкм, комплекс снабжён средством коллективной защиты (кабиной), охватывающей периметр рабочей зоны. Кабина имеет раздвижные двери и окна-светофильтры для наблюдения за ходом технологического процесса.

Для измерения параметров отражённого и рассеянного лазерного излучения в настоящей работе применяли измеритель мощности лазерного излучения “Newport” (mod.1918-C с измерительной головкой mod.918-IG) и дозиметр отражённого и рассеянного лазерного излучения «ЛД-07». С помощью данных приборов проводили измерения плотности мощности отражённого и рассеянного лазерного излучения W (мВт/см²) и сравнение их с величиной предельно-допустимого уровня (ПДУ) лазерного излучения ($W_{\text{пду}}$).

Измерения параметров лазерного излучения производили в различных пространственных зонах, характерных для расположения оператора при работе с комплексом, а также при различных положениях раздвижных дверей

(открыто - закрыто) при максимальной мощности лазерного излучения (10 кВт).

Оценка величины ПДУ лазерного излучения (при воздействии на глаза) производилась на основе методики, изложенной в СанПиН 5804-91. При расчёте величины ПДУ принимались следующие условия и допущения: длина волны лазерного излучения 1,06 мкм, характер излучения – непрерывный, источник отражённого излучения оценивался как точечный, ограничивающей апертурой считался размер зрачка человеческого глаза (8 мм), характерное время непрерывного воздействия излучения на глаз считалось равным 10 сек .

Выводы по результатам проведённых измерений по ЛБ:

1. При лазерной резке металла многокиловаттными лазерами наличие защитной кабины является обязательным элементом соответствующего технологического оборудования. При нарушении этого правила (в рассматриваемых измерениях этот случай моделировался открытой дверью защитной кабины) возможно многократное превышение значения ПДУ отражённого и рассеянного лазерного излучения (до 20 значений ПДУ (для глаз) в зоне нахождения оператора при открытой двери защитной кабины на мощности лазера 10 кВт).

2. Наибольшие значения величины отражённого и рассеянного лазерного излучения достигаются во время процесса врезки (заглубления лазерного луча в металл до получения сквозного реза). Соответственно, алгоритм работы оператора лазерной резки и необходимые защитные средства должны разрабатываться с учётом этого фактора.

3. Защитные устройства (кабины и защитные окна-фильтры) на лазерных комплексах “LaserCut 3015” обеспечивают достаточную защиту оператора от отражённого и рассеянного лазерного излучения при лазерной резке.

Общий вывод по предложенному докладу:

Решение обозначенных в докладе метрологических проблем, а также обеспечение должного уровня лазерной безопасности технологического оборудования требуют объединения усилий всех заинтересованных сторон – как производителей мощных технологических лазеров, так и соответствующих государственных и частных организаций, работающих в области метрологии лазерного излучения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР В ОБЛАСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

**С.И. Аневский, О.А. Минаева, Р.В. Минаев, А.В. Евмененко,
О.Ю. Морозов, Т.Д. Бельмега, А. Рахматулин
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва**

Формирование многослойных наноструктурированных покрытий позволяет получить новые свойства фотоприемников, зеркал, фильтров и дифракционных решеток заданных значений спектральных коэффициентов пропускания и отражения в области вакуумного и ближнего ультрафиолета. Применение многослойных наноструктур особенно актуально в таких областях как наноэлектроника, функциональные наноматериалы, энергетика, космическая техника, системы безопасности, локация плазменных объектов, экологический мониторинг, ранняя диагностика онкологических заболеваний.

Работы по исследованию характеристик многослойных наноструктур ведутся ВНИИОФИ с использованием синхротронного излучения электронных накопительных колец. Создание рабочих эталонов и высокоточных спектрометрических средств измерений для каналов синхротронного излучения необходимо для контроля технологических режимов, разработки методик измерений, калибровки, поверки и испытаний средств измерений. В области вакуумного и ближнего ультрафиолета проводится контроль абсолютной спектральной чувствительности фотоприемников с наноструктурированными покрытиями и спектральных коэффициентов пропускания и отражения зеркал, фильтров и дифракционных решеток.

В ведущих национальных метрологических институтах NIST, PTB, NPL и CNAM работы по метрологическому обеспечению технологии

наноэлектроники и наноструктурированных покрытий проводятся с использованием электронных накопительных колец SURF-III, BESSY-II, MLS, SOLEY и DIAMAND. Создание во ВНИИОФИ спектрорадиометрических каналов синхротронного излучения электронных накопительных колец включает:

- разработку высоковакуумных спектральных компараторов, согласующих устройств и средств радиационной защиты каналов синхротронного излучения;

- разработку эталонных приемников, радиометров и рефлектометров вакуумного ультрафиолета;

- проведение совместных исследований с ведущими метрологическими центрами по подтверждению метрологических характеристик эталонных средств измерений в наноиндустрии;

- подготовку международных сличений эталонных средств УФ спектрорадиометрии с последующим признанием результатов калибровок;

- гармонизацию разрабатываемых методик с требованиями международных стандартов в области нанотехнологий.

Методы контроля параметров наноструктурированных покрытий, средств измерений, а также методики измерений, поверки, калибровки и испытаний дают возможность моделировать технологические режимы и проводить изучения новых заданных свойств наноструктурированных покрытий на основе использования синхротронного излучения электронных накопительных колец.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

С.И. Аневский, О.А.Минаева, Р.В. Минаев, А.В. Евмененко,

Е.С. Кононогова, А.И.Машилов, А.В. Горонков

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Использование синхротронного излучения открывает широкие возможности для быстрого развития новых высокоточных средств измерений на основе радиометров, спектрометрических, многоэлементных детекторов с обратной экспозицией и позволяет решить целый ряд сложных задач, связанных с измерением радиометрических характеристик медицинских средств диагностики и лечения онкологических заболеваний, элементов литографических установок.

Сравнение состояния уровня научно-технологического развития радиометрии с использованием синхротронного излучения показывает, что наибольшие успехи в этой области достигнуты в Германии, США, Китае и Японии. Примером успешного развития радиометрии синхротронного излучения является работа национального метрологического института Германии Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) с использованием синхротронного излучения электронных накопительных колец BESSY и BESSY II и специально построенного метрологического источника синхротронного излучения MLS. Накопленный опыт радиометрии синхротронного излучения вывел PTB на передовые позиции в мире. Более двадцати метрологических станций круглосуточно используются для проведения метрологических исследований и калибровки радиометров, спектрометрических, дозиметров для германских исследовательских институтов, промышленных предприятий, для предприятий Европейского Союза и многих стран мира.

Развитие радиометрии синхротронного излучения позволяет создать систему метрологического обеспечения высокотехнологичных отраслей, таких как нанотехнологии, космическое приборостроение, фотолитография, медицинская диагностика, точное приборостроение и ставит в зависимость национальную метрологическую службу от зарубежных партнеров. Анализ современных тенденций развития радиометрии при разработке высокоточных методов и средств измерений указывает на возрастающую актуальность контроля метрологических характеристик приемников, источников, радиометров, спектрометрических и дозиметров в спектральном диапазоне рентгеновского, УФ, видимого и ИК излучения с использованием уникальных свойств синхротронного излучения.

За последние годы источники синхротронного излучения стали удобным инструментом для решения важнейших прикладных задач метрологии нанотехнологий, космических исследований, медицинской диагностики и др. Современные тенденции развития радиометрии связаны с увеличением точности, динамического диапазона и сложности калибровок средств измерений на основе использования уникальных для метрологии свойств синхротронного излучения:

- точного расчета спектральных энергетических и поляризационных характеристик синхротронного излучения;
- возможности плавного изменения спектра за счет перестройки энергии частиц;
- широкого диапазона линейной перестройки характеристик - 10^{10} ;
- возможности выделения отдельного электрона на орбите;
- возможности использования гауссова распределения энергетической яркости по излучающей области;
- возможности широкой перестройки эквивалентной яркостной температуры до миллионов градусов.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования методов воспроизведения и передачи единиц спектрометрической

рентгеновского, УФ, видимого и ИК излучения с использованием электронных накопительных колец на основе разработанных методов высокоточной диагностики электронного сгустка, определения энергии и числа частиц, радиуса релятивистской орбиты показали возможность увеличения точности воспроизведения и передачи единиц спектрометрики в широком спектральном диапазоне 0,1 – 1600 нм. Экспериментальные результаты получены с использованием компаратора энергетической освещенности, фильтровых радиометров на основе фотодиодов и телескопа с многоэлементными матричными детекторами при преобразовании потока излучения с учетом требований по коррекции спектральной чувствительности и динамическому диапазону энергетической освещенности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕСКОПА И ПЗС МАТРИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.И. Аневский, О.А. Минаева, Р.В. Минаев, Б.С. Волков,

А.В. Евмененко, А.И. Машилов, А. Грязнов

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Разработка и развитие высокоточных методов и средств метрологического обеспечения космического мониторинга связаны, в первую очередь, с необходимостью измерений пространственного распределения спектральной плотности энергетической яркости по излучающей области источников излучения, а также с необходимостью контроля пороговых характеристик ПЗС-матриц при анализе изображений слабоконтрастных объектов с высоким пространственным разрешением.

В последние годы в национальных метрологических институтах проводится реализация нового подхода, основанного на использовании одноэлектронного режима в современных циклических ускорителях и высокочувствительных охлаждаемых ПЗС-матриц с поверхностными наноструктурами. В ведущих метрологических центрах NIST и PTB работы по метрологическому обеспечению в области экстремального вакуумного и ближнего ультрафиолета являются одним из главных направлений оптической радиометрии и проводятся с использованием современных электронных накопительных колец MLS, BESSY-II и SURF-III. Основные задачи спектрометрики связаны с необходимостью создания методов и средств для передачи единицы энергетической яркости с высоким пространственным разрешением, получения информации о распределении энергетической яркости, созданием методов формирования высокоэффективных отражающих покрытий и зеркал для выделения спектральных диапазонов.

Исследование характеристик телескопа и ПЗС матриц включает:

- анализ влияния погрешности спектральной коррекции чувствительности в рабочем диапазоне длин волн на результаты измерений;
- контроль стабильности чувствительности с учетом старения элементов и возможного образования углеводородной пленки под действием коротковолнового излучения на рабочих поверхностях телескопа;
- контроль динамического диапазона измерений на основе измерений диапазона линейности ПЗС-матрицы.

Для исследования характеристик телескопа с ПЗС-матрицей разработаны следующие методы измерений:

- пространственного распределения спектральной плотности энергетической яркости по излучающей области источников излучения;
- порога чувствительности телескопа с ПЗС-матрицей;
- угловой зависимости чувствительности телескопа от угла падения излучения;
- коррекции чувствительности телескопа и ПЗС матрицы;
- коэффициента линейности чувствительности телескопа с ПЗС матрицей для определения рабочего динамического диапазона энергетической яркости.

Проведена оценка составляющих случайных и систематических погрешностей, характеризующих телескоп и ПЗС матрицу.

ЧЕМ ХУЖЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПРИБОРА, ТЕМ ЛУЧШЕ

В.Н. Кузьмин, А.Л. Марьин
НТП «ТКА», Санкт – Петербург

Цветовые и эффективные характеристики источников оптического излучения, как правило, измеряют двумя способами:

- с помощью интегральных измерений приемниками оптического излучения, спектральная характеристика которых скорректирована к заданному виду – приборами интегрального типа;
- с помощью измерения спектрального состава исследуемого источника и последующего вычисления необходимых фотометрических величин – спектроколориметрами.

Недостатком первого способа является трудность коррекции фотоприемника под заданную эффективную чувствительность.

Недостатком второго способа является техническая трудность реализации спектрального измерительного прибора с дискретным фотоприемником.

Принцип действия большинства спектральных приборов можно пояснить с помощью графиков, приведенных на *рис.1*. Форма кривой 1 соответствует функции $f(\lambda)$, описывающей исследуемый спектр — распределение энергии излучения по длинам волн λ . Кривая 2 соответствует функции $a(\lambda-\lambda')$, описывающей способность спектрального прибора выделять из светового потока узкие участки $\delta\lambda$ в окрестности каждой λ' . Эту важнейшую характеристику спектрального прибора называют функцией пропускания, или **аппаратной функцией** (АФ). Процесс измерения спектра $f(\lambda)$ прибором с АФ $a(\lambda-\lambda')$ можно имитировать, регистрируя изменения светового потока, проходящего через отверстие описываемой кривой 2, при перемещении (сканировании) относительно кривой 1. Очевидно, чем меньше

ширина АФ, тем точнее будет измерена форма контура спектра $f(\lambda)$, тем более тонкая структура может быть в нём обнаружена.

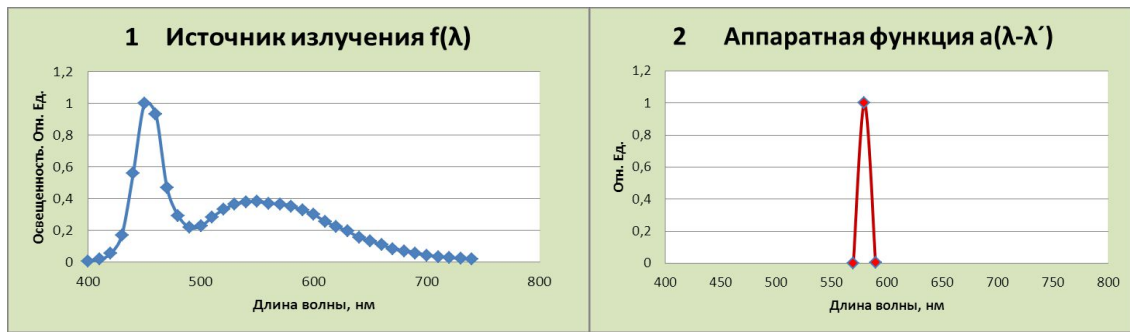


Рис. 1. Исследуемый источник излучения.

2. Аппаратная функция спектрального прибора.

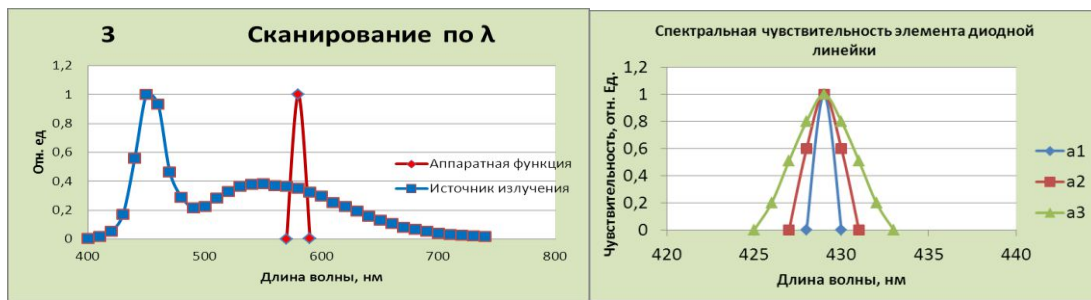


Рис. 3. Процесс исследования источника.

Рис. 4. Спектр. чувствительность элемента линейки.

При увеличении ширины входной щели полихроматора аппаратная функция спектрального прибора увеличивается – “ухудшается”. Это приводит к изменению спектральной чувствительности каждого фоточувствительного элемента фотодиодной линейки, от узкой монохроматической до достаточно широкой, достигающей десятков нм.

Сигнал P_{λ_i} , с каждого элемента фотодиодной линейки равен.

$$P_{\lambda_i}(\lambda) = S_{\lambda_i}(\lambda) \cdot \Phi_{\lambda_i}(\lambda) \quad (1)$$

Если известен «сигнал» $P_{\lambda_i}(\lambda)$ снимаемый с каждого элемента и спектральное распределение падающего потока, т. е. $\Phi_{\lambda_i}(\lambda)$, то легко получить спектральную чувствительность S_{λ_i} каждого элемента. Зная реальную чувствительность каждого элемента линейки, можно получить необходимые поправочные коэффициенты для этого элемента, чтобы привести спектральную чувствительность прибора к виду относительной световой эффективности глаза $V(\lambda)$ (см. Рис. 5), к идеальному «П-образному»

виду, или любой другой кривой спектральной эффективности, для вычисления спектральной освещенности (облученности) входной щели.

Поправочный коэффициент для $V(\lambda)$ можно получить из выражения

при $S_{\lambda i}(\lambda) = V(\lambda)$: (2)

$$S_{\lambda i}(\lambda) = k_{\lambda i} \cdot \frac{P_{\lambda i}(\lambda)}{\Phi_{\lambda i}^{таб}(\lambda)}, \quad (3)$$

где $k_{\lambda i}$ – поправочный коэффициент, учитывающий усиление сигнала для i -го элемента линейки, вырабатываемый микропроцессором; $\Phi_{\lambda i}^{таб}$ – спектральная плотность потока излучения стандартного источника.



Рис. 5. Приведение спектральной чувствительности фотодиодной линейки к виду относительной световой эффективности глаза $V(\lambda)$.

Поправочный коэффициент для «П-образного» вида можно получить из выражения при $S_{\lambda i}(\lambda) = 1$:

$$S_{\lambda i}(\lambda) = k_{\lambda i} \cdot \frac{P_{\lambda i}(\lambda)}{\Phi_{\lambda i}^{таб}(\lambda)}, \quad (4)$$

Аналогичные операции производятся для других спектральных кривых.

Выводы.

Таким образом, используя диспергирующую систему полихроматора – для формирования спектральной чувствительности фотодиодной линейки, получаем принципиально новый тип фотоколориметра для проведения

цветовых измерений, в котором используется принцип, **чем хуже спектральное разрешение, тем лучше.**

В нем удачно сочетаются воедино преимущества приборов как спектрального, так и интегрального типа.

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНОГО ОБРАЗЦА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛА

А.Д. Левин¹, М.К. Аленичев¹, Е.А. Шмыткова¹,

В.М. Масалов², Г.А. Емельченко²

¹ФГУП «ВНИИ оптико-физических измерений», Москва

²ФГБУН «Институт физики твердого тела РАН», Черноголовка

Основным показателем устойчивости коллоидных растворов является электрокинетический или дзета-потенциал (Zeta potential - ZP), который определяет электростатическое взаимодействие между частицами дисперсной системы. ZP представляет собой электрический потенциал на поверхности скольжения, который возникает за счет разности потенциалов, возникающих между диспергированной частицей и дисперсной средой в силу перемещения частицы. Один из основных способов измерения ZP основан на электрофоретическом рассеянии света и заключается в измерении подвижности наночастиц, осуществляющих дрейф под воздействием электрического поля, приложенного к образцу, и последующем вычислении ZP. Для такого вычисления требуются данные о размерах и форме частиц, а также о диэлектрической проницаемости и динамической вязкости жидкости, в которой они взвешены.

В настоящее время для обеспечения единства измерений ZP могут быть использованы стандартный образец (СО) положительной электрофоретической подвижности SRM NIST 1980 (США) [1] и СО сферических наночастиц диоксида кремния в водном растворе ERM-FD100 (Европейский институт), для которого приводится аттестуемое значение $ZP = -43,0 \text{ мВ} \pm 21,8 \text{ мВ}$ [2]. Кроме того, известны не имеющие официального статуса образцы сравнения DTS 1235 на основе водного раствора частиц полистирольного латекса, предлагаемые фирмой Malvern ($ZP = -42 \pm 4,2 \text{ мВ}$). Для перечисленных образцов можно указать следующие ограничения:

А) Образец SRM 1980 (NIST, США) воспроизводит лишь значения электрофоретической подвижности, необходимые данные для вычисления ZP при этом пользователю приходится находить самостоятельно.

Б) Для всех упомянутых выше образцов отсутствуют данные о распределении ZP.

В связи с этим в ФГУП «ВНИИОФИ» разрабатывается СО дзета-потенциала, не имеющий указанных ограничений. В качестве материала СО используются водные суспензии наночастиц двуокиси кремния, имеющие мономодальное распределение ZP, при этом абсолютная величина среднего значения ZP должна быть не менее 30 мВ, что необходимо для устойчивости СО по отношению к агрегации частиц.

В качестве аттестованного значени СО выбраны среднее значение ZP, а в качестве справочного – распределение ZP. В рамках отработки СО были проведены измерения дзета-потенциала коллоидных растворов наночастиц двуокиси кремния отечественного и импортного производства на анализаторах частиц ZetasizerNano ZS в лабораториях ФГУП «ВНИИОФИ» и ФГУП «Центр Келдыша». В таблице представлены средние значения ZP и отклонения от средних значений, полученные в этих измерениях.

Наименование образца	Результаты измерений дзета-потенциала, ζ , mV		
	18.05.2015	27.02.2015	04.03.2015
Коллоидный раствор наночастиц двуокиси кремния фирмы CORPUSCULAR (USA), массовая концентрация 5%, диаметр ~30 нм	-39,6±4,08*	-	-
Коллоидный раствор наночастиц двуокиси кремния произведенный в ФГБУН «Институт физики твердого тела РАН» (Россия), массовая концентрация 2,7 %, диаметр ~20 нм	-32,7±7,43*	- 32,1±6,85*	-32,6±8,24* -33,7 ±4,97**

* ВНИИОФИ ** Центр Келдыша

Измеренное распределение ZP для отечественного образца приведено на рисунке 1. Видно, что данный образец обладает необходимым значением ZP и одномодальным распределением, т.е. имеющим всего один пик. Однако ширина этого пика в 2 – 2,5 раза больше, чем у образцов фирмы Corpuscular.

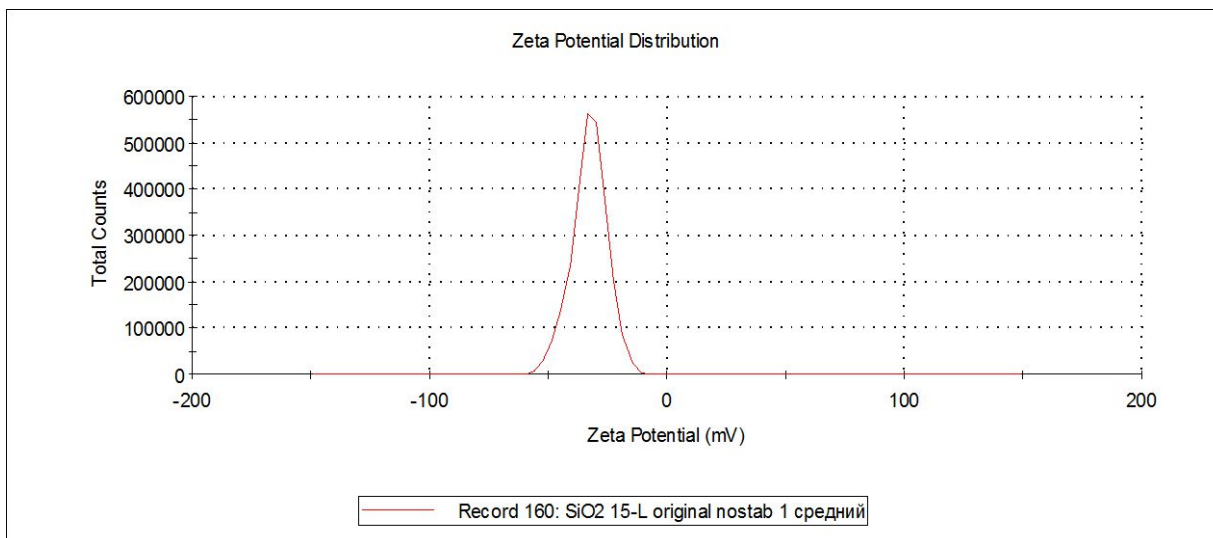


Рисунок 1.

В настоящее время ведутся работы по улучшению характеристик материала СО (повышению стабильности во ремени значений ZP и получению распределений с более узким пиком). В дальнейшем предполагается проведение испытаний СО в целях утверждения типа. При этом метрологическая аттестация образцов будет производиться путем измерений по аттестованной методике в нескольких лабораториях.

Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках прикладного научного исследования (уникальный идентификатор RFMEFI62414X0009).

Список литературы

1. Positive Electrophoretic Mobility (+ μ E) Standard. Standard Reference Material® 1980, Certificate of analysis, NIST, 2012.
2. Braun A., Franks K., Kestens V., Roebben G., Lamberty A., Linsinger T. Certification of Equivalent Spherical Diameters of Silica Nanoparticles in Water - Certified Reference Material ERM®-FD100 // Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011, – 68 pp, ISBN 978-92-79-18676-9.

ЛИНЕЙНЫЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЕМ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕДАЧИ ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ.

Н. П. Хатырев, А. А. Щербина

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Одним из наиболее перспективных методов метрологических исследований, основанных на применении оптических комб - генераторов, является метод линейного оптического гетеродинного приема. Он позволяет извлекать дополнительную информацию о процессах распространения последовательностей фемтосекундных оптических импульсов при передаче эталонных сигналов по различным трассам. Этот метод расширяет возможности применения в метрологии комб - генераторов по сравнению с более широко используемой технологией передачи эталонных сигналов частоты путем привязки их частотной шкалы к тому или иному стандарту частоты.

Данный метод позволяет с высокой точностью измерять параметры последовательностей фемтосекундных импульсов с помощью автокорреляционных функций первого порядка (АКФ). Результаты таких измерений обеспечивают возможность сравнения и стабилизации удаленных комб - генераторов друг относительно друга и передавать таким образом эталонные сигналы частоты. Метод создает также предпосылки для прецизионных измерений различных физических параметров, например показателей преломления сред.

Для понимания сущности метода линейного гетеродинного приема рассмотрим одиночный лазерный импульс, падающий на интерферометр Майкельсона, интенсивность сигнала на его выходе, очевидно, зависит от разности хода лучей. Эта разность характеризует степень отличия сигнала от его смещенной во времени копии. Пусть временная зависимость вектора

напряженности электрического поля излучения лазера описывается функцией $E(t)$. На выходе интерферометра Майкельсона с разностью хода между его лучами, приводящей к задержке τ , поле излучения в месте расположения фотоприемника имеет вид:

$$E'(t) = \frac{1}{2} [E(t) + E(t - \tau)]$$

Постоянная времени фотоприемника T всегда значительно больше периода оптической несущей или фемтосекундного импульса, который может содержать в себе несколько периодов, поэтому он регистрирует величину:

$$\begin{aligned} I(\tau) &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0-T} \frac{1}{4} [E(t) + E(t - \tau)]^2 dt \\ &= \frac{1}{2T} \int_{t_0}^{t_0-T} [E(t)]^2 dt + \frac{1}{2T} \int_{t_0}^{t_0-T} \frac{1}{4} [E(t)E(t - \tau)]^2 dt \end{aligned}$$

где t_0 - произвольный начальный момент времени. В приведенной формуле первый интеграл представляет собой среднюю интенсивность излучения, не зависящую от разности хода лучей в интерферометре. Второй интеграл есть автокорреляционная функция для поля излучения.

На рис.1 представлен характерный вид АКФ. Ширина огибающей АКФ для гауссова импульса в два раза больше длительности самого импульса.

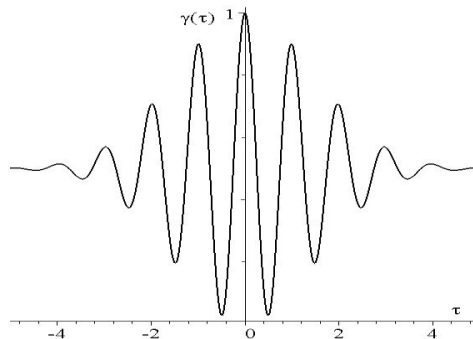


Рис. 1 Автокорреляционная функция короткого когерентного лазерного импульса с гауссовой формой огибающей

Для рассматриваемого случая строго периодических последовательностей фемтосекундных лазерных импульсов, генерируемых комб-генераторами, возникает возможность измерений АКФ с разрешением интерференционных полос. Метрологические применения последовательностей фемтосекундных лазерных импульсов имеют смысл только при обеспечении предельно низких значений погрешности. Так, например, при передаче эталонных сигналов частоты, погрешность передачи не должна превышать $10^{-16} - 10^{-17}$. Поэтому реализация методов и техники экспериментов по измерениям автокорреляционной функции превращается в очень сложную задачу и требует применения уникальной высокоточной аппаратуры. Достижение требуемого уровня точности потребовало принятия мер по изоляции интерферометра от механических колебаний пола помещения лаборатории и устранения акустических шумов в лаборатории [1].

Известные сведения об интерференции фемтосекундных импульсов [2, 3] позволили сделать предположение о сохранении когерентности фемтосекундных импульсов от двух разных, но привязанных к одному стандарту частоты комб - генераторов.

В результате наших экспериментов были получены корреляционные пики от двух смещенных по частоте повторения лазерных источников фемтосекундных импульсов. Эта методика по принципу действия аналогична стробоскопическому или нониусному эффекту, когда один импульс постепенно «догоняет» другой, за счет внесения разности частот повторения, в отличие от описанной выше классической методики, когда необходимо прецизионно перемещать плечо интерферометра для осуществления сканирования.

На рисунке 2 показана полученная в наших экспериментах корреляционная функция.

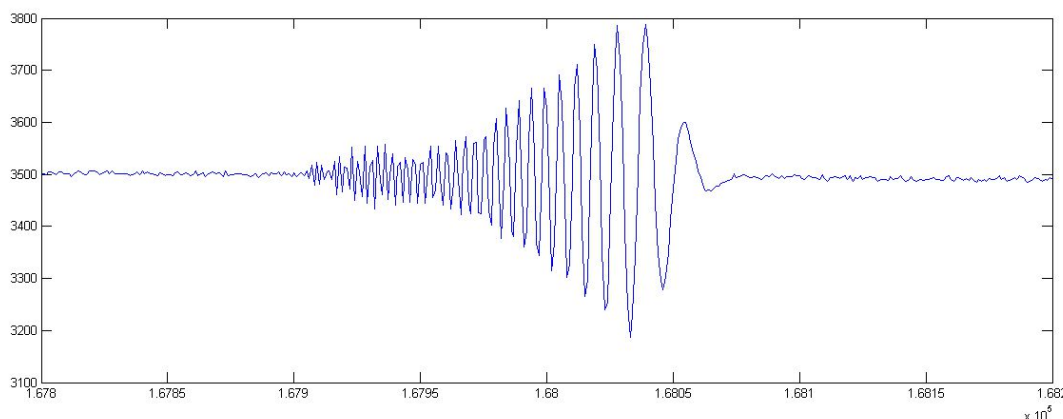


Рис. 2 Измеренная корреляционная функция от двух комб генераторов.

Безусловно, основное допущение, связанное с тем, что импульсы от двух разных источников идентичны, накладывает ограничение на точность и правомерность распространения последующего анализа измеренных характеристик, однако с другой стороны комб - генератор сам по себе является более гибким инструментом, позволяющим более точно перестраивать частоты повторения и подробно «прорисовывать» импульс, например, внося временные сдвиги, которые могут быть снижены до аттосекунд. Кроме того, существует возможность некоторого сдвига частотной шкалы, генерируемой комб-генератором. Такое смещение частотной шкалы позволяет при проведении экспериментов анализировать спектральную составляющую, влияющую на корреляционную функцию.

В то же время, если не углубляться в анализ самих импульсов, можно найти немало прикладных областей, в которых можно использовать данный метод. Например, оказывается возможным анализировать показатели преломления и их изменения со временем, что особенно актуально для открытой атмосферной передачи эталонных сигналов частоты.

В рамках данной работы был проведен эксперимент, позволивший выявить некоторые особенности практической реализации метода линейного

гетеродинного приема для процесса передачи эталонных сигналов времени и частоты по открытому пространству.

На рисунке 3 представлены корреляционные пики, соответствующие сигналам, отраженным от различных поверхностей.

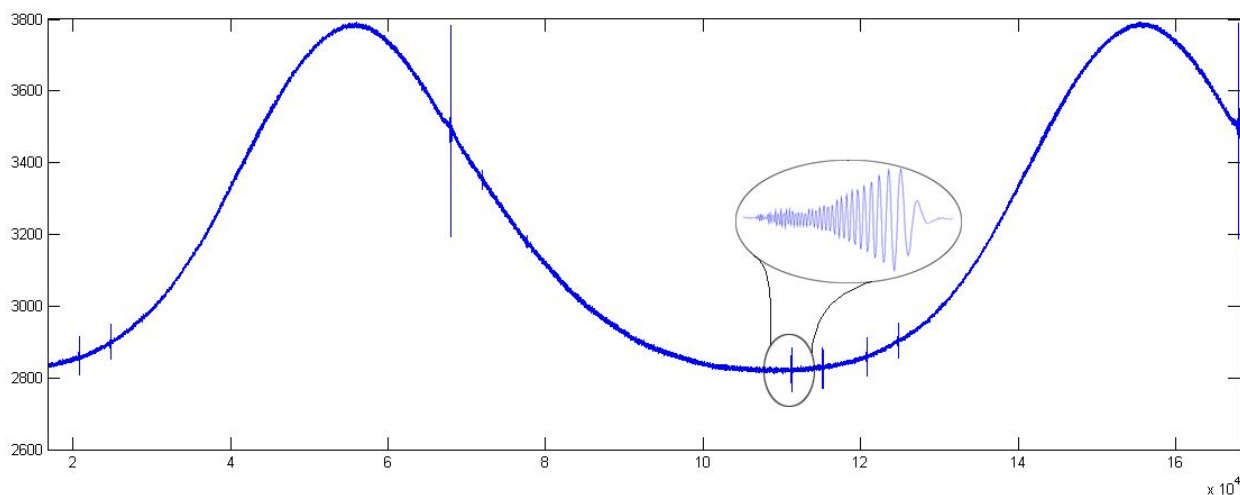


Рис. 3 Пики полученных отражений от различных поверхностей.

Так, маленькие пики в левой части графика соответствуют отражениям от передней и задней плоскостей плоскопараллельной пластинки, установленной на пути распространения последовательности фемтосекундных импульсов. Зная толщину пластинки и пересчитав время распространения и регистрации корреляционных импульсов, можно определить ее показатель преломления. После пересчета, полученное значение показателя преломления составило 1,52, что показывает хорошее совпадение экспериментальных данных с табличными значениями показателей преломления пробных стекол. В данном случае не ставилась задача достижения предельно низких погрешностей измерений показателя преломления и не производился их детальный анализ. Была лишь наглядно подтверждена возможность проведения подобных измерений. Однако широкие возможности, связанные с набором статистики и усреднения регистрируемых импульсов, а также учета фазы и интерференционных

соотношений, позволяют судить о высокой точности и перспективности данного метода.

В дальнейшем рассмотренный метод будет использован при исследованиях в области передачи эталонных сигналов времени и частоты, что необходимо, в частности, для расширения возможностей и повышения точности системы ГЛОНАСС.

Список литературы

1. «Введение в оптику ультракоротких лазерных импульсов» В.И. Борисов, В.И. Лебедев, С.Н. Перепечко. - Могилев МГУ им. А. А. Кулешова, 2004
2. «Расчет времени когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума в кварцевом оптическом волокне» М. В. Мельник, А. Н. Ципкин. «Научно-технический вестник информационных технологий, механики, оптики, 2013 №3 (85)».
3. «Optical two-way time and frequency transfer over free space» Fabrizio R. Giorgetta^{1*}, William C. Swann¹, Laura C. Sinclair¹, Esther Baumann¹, Ian Coddington¹ and Nathan R. Newbury^{1*} ¹National Institute of Standards and Technology, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305 *e-mail: fabrizio@nist.gov; nnewbury@boulder.nist.gov Work of the U.S. government, not subject to copyright.

ИЗМЕРЕНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ

А.Ю. Садагов¹, С.В. Ремпель², Ю.В. Кузнецова², А.Д. Левин¹

¹ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твёрдого тела, Екатеринбург,

Квантовый выход (КВ) характеризует интенсивность возбуждения флуоресценции в данном веществе, он определяется отношением количества испускаемых фотонов к числу поглощенных фотонов. Он является важнейшей характеристикой флуоресцентных свойств вещества, от которой зависит возможность его использования в качестве материала для флуоресцентных меток и зондов в различных приложениях, прежде всего в биомедицинских. В последнее время все большее внимание уделяется исследованию флуоресцентных свойств наноразмерных фрагментов полупроводниковых кристаллов - так называемых квантовых точек (КТ). В отличие от макрочастиц, электронная структура и оптические свойства, в том числе квантовый выход и спектры флуоресценции КТ существенно зависят от их размерных параметров. Именно возможность управлять в широких пределах флуоресцентными свойствами делает КТ весьма перспективными для использования при детектировании биологических молекул, визуализации изображений во флуоресцентной микроскопии, в различных наносенсорных системах. Методические проблемы, связанные с измерением квантового выхода флуоресценции КТ, рассматривались в работе [1].

В докладе приводятся результаты измерений квантового выхода коллоидных растворов КТ из сульфида кадмия (CdS). Эти наночастицы, помимо упомянутых выше приложений, являются перспективными для солнечных элементов, лазеров, очистки воды от органических примесей. Для измерений был использован относительный метод, основанный на сравнении

спектров флуоресценции и оптических плотностей на длине волны возбуждения для исследуемого образца и образца сравнения с известным значением квантового выхода.

Квантовый выход флуоресценции исследуемого образца вычисляется по формуле

$$\Phi_f^i = \frac{F^i f_s n_i^2}{F^s f_i n_s^2} \Phi_f^s$$

где, Φ_f^i и Φ_f^s - квантовый выход исследуемого образца и образца сравнения, F^i и F^s - значения интегралов спектров флуоресценции исследуемого образца и образца сравнения, f_i и f_s - значения оптической плотности на длине волны возбуждения для исследуемого образца и образца сравнения, n_i и n_s - показатели преломления исследуемого образца и образца сравнения соответственно.

В качестве образцов сравнения использовались сульфат хинина и родамин 6G, значения квантового выхода которых приведены в [2].

Измерения флуоресценции и оптической плотности проводились на приборе СФФ-2 «Флуоран», разработанном во ФГУП «ВНИИОФИ», совмещающем двухлучевой спектрофотометр и спектрофлуориметр.

Для достоверного определения квантового выхода флуоресценции относительным методом необходимо оперировать аппаратно-независимыми спектрами, т.е. спектрами, которые не зависят от параметров прибора. Это обусловлено тем, что мы используем значение квантового выхода образца сравнения, взятое из литературных данных, но вместе с ним используются интегралы спектров флуоресценции, значения которых могут меняться вместе с формой спектра, которая зависит от приборных параметров. Коррекция канала возбуждения осуществлялась с помощью фотоприемника, откалиброванного на вторичном эталоне спектральной чувствительности

ВЭТ 86-7-2010, ФГУП «ВНИИОФИ», эмиссионный канал корректировался с помощью стандартных образцов интенсивности рассеяния, разработанных ФГУП «ВНИИОФИ».

Образцы CdS, для которых производились измерения, имели очень низкие значения квантового выхода (существенно меньше 1 %). Поэтому спектры флуоресценции образца сравнения и исследуемого образца приходилось измерять при разной чувствительности ФЭУ и использовать для корректного сопоставления этих значений специальные калибровочные процедуры.

На рисунке 1 приведены спектры флуоресценции растворов квантовых точек CdS (а) и флуоресценции сульфата хинина (б).

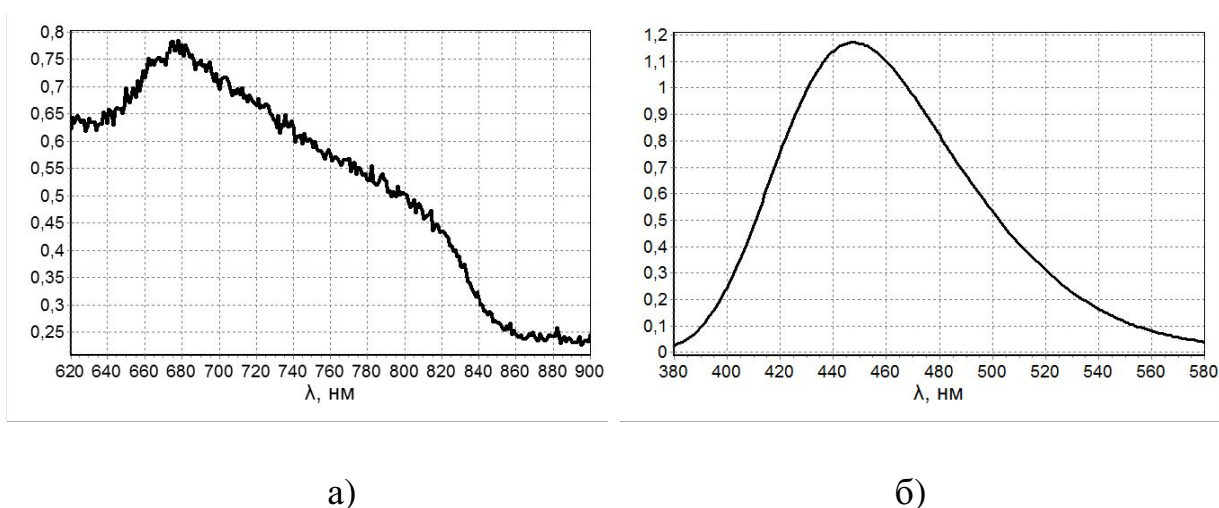


Рисунок 1

Список литературы

1. Grabolle M. *et al.*, Determination of the Fluorescence Quantum Yield of Quantum Dots: Suitable Procedures and Achievable Uncertainties, *Analytical Chemistry*, 2009, Vol. 81, p.p. 6285–6294.
2. Brouwer A.M., Standards for photoluminescence quantum yield measurements in solution (IUPAC Technical Report), *Pure and Applied Chemistry*, 2011, Vol. 83, No. 12, pp. 2213–2228, 2011.

**ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С МОДАМИ ТИПА
«ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ» ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ,
РАССЕЯНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕЛИНЕЙНОСТИ
НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ФОТОНИКИ**

В.Л. Лясковский¹, И.А. Биленко^{1,2}

¹ФГУП «ВНИИОФИ», ²МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва

Оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи (МШГ) сочетают в себе высокую оптическую добротность (до 10^{11}) с малым размером (от десятков микрон до нескольких миллиметров). Было показано, что с помощью МШГ может быть достигнут фундаментальный предел оптических потерь в кварцевом стекле [1]. В настоящее время микрорезонаторы изучаются и применяются в десятках лабораторий по всему миру [2]. В данной работе предлагается использовать МШГ для высокоточного измерения различных оптических свойств существующих и перспективных материалов.

Несмотря на то, что добротность МШГ, измеряемая в экспериментах, зависит от многих факторов, уникальные свойства МШГ позволяют измерять их вклады по отдельности.

Полная добротность МШГ Q_S определяется следующим соотношением:

$$Q_S^{-1} = Q_{\text{rad}}^{-1} + Q_{\text{b.a.}}^{-1} + Q_{\text{b.s.}}^{-1} + Q_{\text{s.s.}}^{-1} + Q_{\text{s.a.}}^{-1} + Q_c^{-1}$$

Величина Q_{rad} определяется радиационными потерями, которые пренебрежимо малы, если длина окружности превышает нескольких десятков длин волн. $Q_{\text{b.a.}}$ и $Q_{\text{b.s.}}$ определяются объемным поглощением и объемным рассеянием, соответственно. $Q_{\text{s.s.}}$ и $Q_{\text{s.a.}}$ определяются поверхностным поглощением и поверхностным рассеянием, и могут быть сделаны гораздо меньше, чем вклады объемных эффектов посредством глубокой полировки и специальной обработки поверхности. Q_c определяется потерями, вносимыми связью с источником и приемником излучения. В отличие от резонаторов Фабри-Перо, в которых эти потери фиксированы и

определяются пропусканием зеркал, в МШГ, где обычно используется связь через выпадающее поле, они могут регулироваться изменением зазора между МШГ и элементами связи.

Наблюдение оптических мод в МШГ обеспечивает возможность измерять рассеяние и поглощение в материале независимо. Рассеяние в МШГ приводит не только к оптическим потерям, но и к возбуждению волны, движущейся в обратном направлении, и следовательно, к расщеплению резонансов в дублеты. Это расщепление позволяет определить вклад рассеяния в оптических потерь [3]. В свою очередь, оптическое поглощение к различным нелинейным эффектам: а) поглощение вызывает нагрев и сдвигает резонансную частоту б) в материалах с небольшой шириной запрещенной зоны двухфотонное поглощение приводит к изменению показателя преломления в) в полупроводниковых материалах изменение концентрации носителей под воздействием света одновременно изменяет коэффициент потерь. Эти три эффекта характеризуются различными постоянными времени, зависимостями от мощности накачки и температуры и могут быть легко разделены.

В рамках данной работы была создана установка для прецизионного измерения собственных частот и добротностей МШГ в зависимости от их материала, геометрии и подводимой мощности (см. рис. 1). Она состоит из перестраиваемых лазеров с узкой линией: 25 мВт 1,55 мкм и 100 мВт 1.064 мкм, электрооптического модулятора, прецизионных 3х координатных подач с ручным и пьезо приводом, оптического микроскопа и FIND-R-SCOPE © визуализатора инфракрасного диапазона с камерой высокого разрешения.

Одним из перспективных материалов для фотоники является кремний, однако, проблема создания МШГ из него заключаются в том, что показатель преломления кремния очень большой (3,45), что ограничивает выбор материалов элементов связи ($n_{coupl} \geq n_{Si}$). Для интегральных резонаторов обычно используют полосковые волноводы, изготавливаемые в том же процессе, что и резонаторы. Однако, пока изготавливать интегральные

резонаторы с высокой добротностью не удается. В данной работе планируется использовать резонаторы диаметром 3-6 мм, изготовленные из кристаллов Si, CaF₂, MgF₂, LiNbO₃ на прецизионном станке алмазного точения (применяется для производства контактных линз и искусственных хрусталиков). В качестве элементов связи для кремниевых резонаторов будут использованы полусферы, изготовленные на этом же станке.

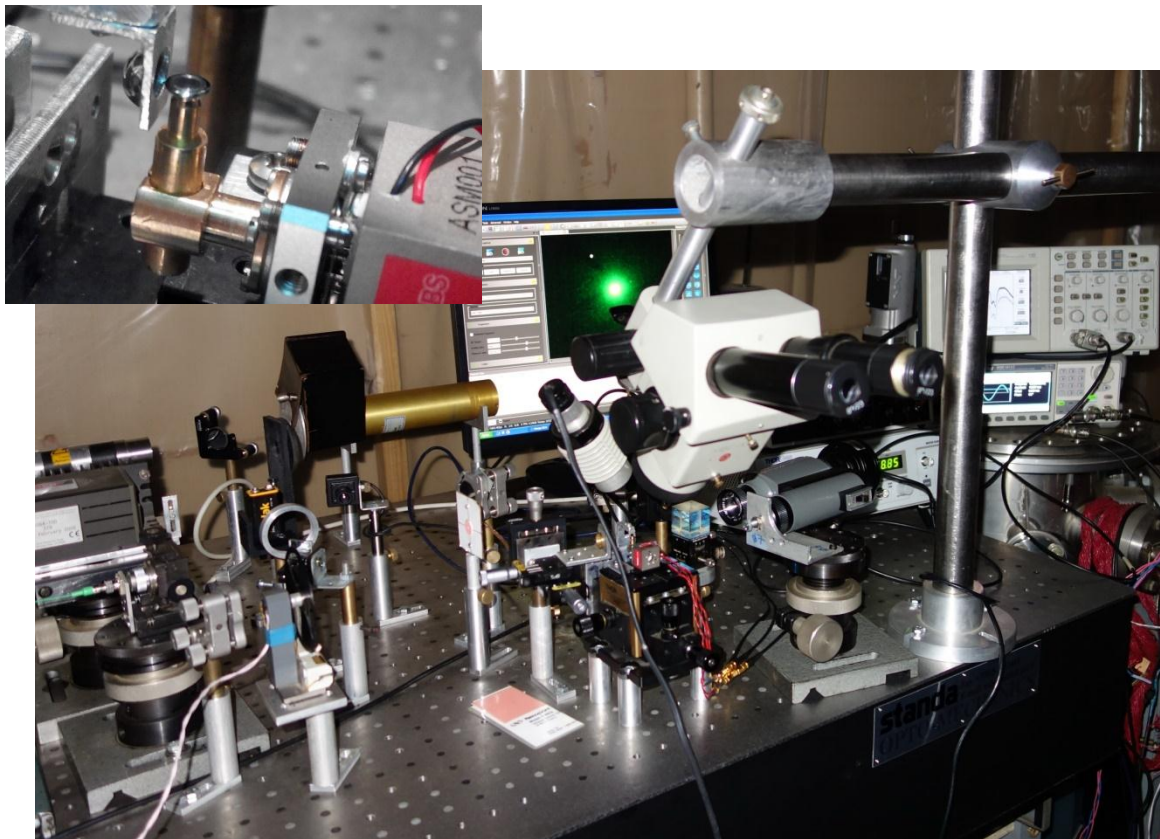


Рис. 1. Экспериментальная установка для высокоточного измерения оптических свойств материалов фотоники с помощью микрорезонаторов с модами типа «шепчущей галереи». На врезке сверху слева: кремниевый резонатор с элементом связи крупным планом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение от 25 августа 2014 г. № 14.625.21.0004).

Список литературы

1. V.B.Braginsky, M.L.Gorodetsky, V.S.Ilchenko, “Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes”, Physics Letters A, **137** 393, (1989).
2. M.L.Gorodetsky, V.S.Ilchenko, A.A.Savchenkov, “Ultimate Q of optical microsphere resonators”, Optics Letters, 21, **453** (1996).
3. M.L.Gorodetsky, A.D.Pryamikov, V.S.Ilchenko, Rayleigh scattering in high-Q microspheres, JOSA B, **17**, 1051 (2000).

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОВ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. А. Петухов

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Проблема обработки изображений является одной из самых актуальных проблем в области цифровой обработки сигналов. К основным задачам обработки (фильтрации) изображений можно отнести повышение контраста, резкости, подавление шума. Основная задача подавления шума в изображении – улучшение его визуального восприятия или выделение полезного сигнала.

Шум - беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Цифровой шум изображения – дефект изображения, вносимый фотосенсорами и электроникой устройств, которые их используют (цифровые фотоаппараты, теле-/видеокамеры и др.) из-за несовершенства технологий. Источники шума могут быть различными – аналоговый шум (грязь и пыль на пленке, царапины, зернистость), основным источником цифрового шума является фотосенсор или фотоматрица. Существуют разные типы шумов, такие как: белый шум, импульсный шум. Фоточувствительные матрицы используются в качестве регистрирующих элементов в большинстве микроскопических систем.

Помимо визуального критерия, качество подавления шума определяют с помощью пикового отношения сигнала к шуму (PSNR), среднего квадратичного отклонения. Существуют разные методы подавления шума в сигналах. К основным из них можно отнести медианный фильтр, фильтр Гаусса, линейное усреднение пикселей, фильтры на основе вейвлет-преобразования, Фурье преобразование.

В настоящей работе рассматривается применение стандартных методов и методов на основе вейвлетов для обработки изображений поверхности, полученных с помощью электронной и интерференционной микроскопии.

Вейвлет-преобразование обладает определенными преимуществами по сравнению со стандартными методами. К примеру, оно обладает свойством масштабируемости. В отличие от Фурье преобразования, при использовании вейвлет-преобразования не осуществляется поиск циклических частот, а определяется размер детали в определенный момент времени t . То есть, нет необходимости несколько раз выполнять преобразование, все частоты будут получены за один проход.

Вейвлет – это математические функции, позволяющие анализировать различные частотные компоненты данных.

Для преобразования сигнала используется общий вычислительный принцип: исходный сигнал умножается на некоторую «анализирующую функцию» и интегрируется по всей временной оси. «Анализирующая функция» определяет тип преобразования и зависит от частоты или размеров деталей, которые должны быть измерены. Для анализа сигнала используются такие вейвлеты, как вейвлет Хаара, вейвлет Добеши, Би-сплайн и т.д.

Чтобы оценить качество подавления шума на основе вейвлетов, целесообразно реализовать стандартный метод и метод на основе вейвлет-преобразования и сравнить полученные результаты с оригинальным изображением. В изображениях, как правило, имеются объекты разных размеров. Вейвлет-преобразование должно допускать кратномасштабный анализ, т.е. классифицировав некоторым образом часть деталей как шум проводить фильтрацию на основе анализа особенностей сигнала. Вместо термина «детали» часто употребляется термин «коэффициенты масштабирования». Высокие частоты соответствуют мелким деталям и наоборот.

Разработка методов на основе вейвлет-преобразования обусловлена необходимостью решения прикладных задач, таких как анализ сейсмических

сигналов, поверхностей, анализ сигналов с помощью вейвлетов позволяет обнаруживать наличие скачков и нерегулярностей в сигналах.

В данной работе представлены результаты применения методов вейвлет-преобразования к изображениям поверхности, полученных с помощью электронной и интерференционной микроскопии. Реализован стандартный медианный фильтр и метод на основе вейвлет-преобразования с использованием вейвлета Хаара и Добеши. Проводится сравнительный анализ этих методов и оценка качества подавления шума в изображении на основе критерия PSNR и MSE.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Я.И. Ермакова, А.В. Иванов, Н.П. Муравская, Е.А. Рекстина

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

На сегодняшний день важным направлением в измерении массовой доли элементов чистых веществ является прослеживаемость результатов измерений к государственным эталонам.

Методологическая база, удовлетворяющая требованиям современных отраслей, таких как авиакосмическая, металлургическая, атомная энергетика, в настоящее время недостаточна.

Проблему метрологического обеспечения массовой доли в чистых веществах можно решать несколькими путями:

- 1) Создание стандартных образцов высокочистых веществ;
- 2) Создание методик измерений, в том числе и референтных.

Создание стандартных образцов высокочистых веществ является достаточно дорогостоящей задачей, а кроме того, некоторые чистые вещества долго не живут (радионуклиды). Самый удобный путь решения проблемы метрологического обеспечения массовой доли элементов в чистых веществах- это создание методик.

Учитывая данный факт, в ходе данной работы были поставлены следующие задачи:

- 1) Разработка референтных методик измерения массовой доли элементов в чистых веществах (кобальте и железе) для передачи единицы величины от Государственного первичного эталона ГЭТ 196-2011.

- 2) Обеспечение прослеживаемости измерений содержания примесей в чистых веществах к Государственному первичному эталону ГЭТ 196-2011.

- 3) Оценка неопределённости измерений содержания примесей атомно-абсорбционным методом.

Сотрудниками отдела испытаний и сертификации ФГУП «ВНИИОФИ» были разработаны и аттестованы следующие методики:

- референтная методика измерений массовой доли свинца, меди, кобальта, никеля, магния, натрия, цинка, калия, марганца, хрома и кремния в железе;
- референтная методика измерений массовой доли алюминия, меди, железа, бария и кадмия в кобальте.

В качестве метода измерений была выбрана атомно - абсорбционная спектрометрия с электротермической атомизацией. В качестве СИ были выбраны: атомно-абсорбционный спектрометр с электротермической атомизацией AA 280Z (Varian) и атомно-абсорбционный спектрометр с электротермической атомизацией ААС КВАНТ-Z.Эта (ООО «КОРТЭК»).

Оба средства измерения зарегистрированы в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений под номерами 16496-09 и 14981-06 соответственно, и входят в состав государственного эталона единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов – ГЭТ 196-2011.

Для разработки методик были взяты следующие образцы: Со и Fe. Для каждого вещества были приготовлены по 5 параллельных проб, которые были изучены на содержание исследуемых примесей. Для каждого исследуемого элемента подбирались условия анализа: программа нагрева пробы, дозируемые объемы, используемые модификаторы. Точность измерений обеспечивалась методом калибровок по ГСО искомых элементов и расчетным методом добавок (добавлением известной концентрации в пробу и введением рассчитанного поправочного коэффициента на полученное значение концентрации элемента в пробе).

Массовую долю элементов X в процентах вычисляют по формуле:

$$X = \frac{(C - C_{хол}) \cdot V}{10^6 \cdot m} \cdot 100 ,$$

где:

C – концентрация элемента в растворе пробы, найденная по калибровочному графику, мкг/дм³;

$C_{хол}$ – концентрация элемента в «холостых» растворах, мкг/дм³;

V – объём раствора пробы (колбы) после растворения, дм³;

m – масса навески пробы, г.

Результаты измерений были оформлены в виде протокола.

Был произведён расчет расширенной неопределенности измерений согласно Руководству ЕВРАХИМ/СИТАК «Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях» и РМГ 43-2001 Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».

Разработанные референтные методики были аттестованы и им присвоены номера свидетельств об аттестации методик измерений.

Планируется разработка референтных методик для ряда чистых веществ (медь и индий и др.).

ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ В СЛОЖНЫХ МАТРИЦАХ

Н.П. Муравская, А.В. Иванов, Я.И. Ермакова, И.Н. Зябликова,

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

В современном мире рыночной экономики в атмосфере активной конкуренции на рынке появляется большое количество различного товара и производителей. Вопрос качества производимого товара и его контроля является на данный момент одним из наиболее актуальным, особенно в таких отраслях промышленности, как авиастроение, машиностроение, микроэлектроника, нанотехнологии и другие.

ФГУП «ВНИИОФИ» ведет работы в области метрологического обеспечения разработки и применения специальных авиационных сплавов.

Основные характеристики сплавов сильно зависят от легирующих и микропримесей. Чтобы придать материалу необходимые свойства, нужно точно соблюдать при производстве количество добавляемых элементов.

Отсюда возникает необходимость обеспечения достоверных и сопоставимых результатов измерений элементного состава различных сплавов, а также уменьшения неопределенности проводимых измерений.

Для улучшения данных показателей необходимо изучение и уменьшение влияющих факторов.

Основными мешающими факторами для спектральных методов являются спектральные и матричные влияния. Спектральная составляющая по большей части зависит от класса и качества оборудования. Матричные влияния зависят от химического состава материала и взаимодействий его составляющих между собой. Особенно явно это наблюдается в сложных многокомпонентных матрицах.

Одним из способов уменьшения матричных влияний является использование модельных растворов.

Модельные растворы представляют собой аттестованные смеси, приготовленные из ГСО растворов ионов или стандартных растворов, максимально близко имитирующие состав изучаемых материалов. Разница между опорными значениями концентраций и предполагаемыми значениями концентрации не должна превышать 10 %.

Анализ модельных растворов производят в цикле с реальными пробами, чередуя их. По полученным данным производят расчет поправочного коэффициента:

$$k = \frac{C_{\text{найд}}}{C_{\text{опорное}}}$$

где $C_{\text{найд}}$ – полученное значение концентрации искомого элемента в модельном растворе;

$C_{\text{опорн.}}$ – рассчитанное опорное значение концентрации искомого элемента в модельном растворе.

Далее рассчитывают концентрации примесей с учетом полученного поправочного коэффициента по формуле:

$$C = \frac{C_{\text{найд}}}{k}$$

где $C_{\text{найд}}$ – полученное значение концентрации искомого элемента в пробе;

k – поправочный коэффициент.

Исследование использования модельных растворов производилось ФГУП “ВНИИОФИ” совместно с ФГУП “ВИАМ”.

В качестве исследуемых материалов были выбраны следующие ГСО: ГСО 2528-83 состава сплава на никелевой основе типа ХН70МВТЮБ (Н9а), ГСО 1609-79 состава сплава на никелевой основе типа (Н15), ГСО 1479-91П состава сплава на никелевой основе типа ХН62МВКЮ (Н136), ГСО 549-88П состава сплава на никелевой основе типа ХН80ТБЮ (Н76). Выбор никелевой

основы обусловлен наибольшей трудоемкостью определения легирующих и микропримесей в данной матрице.

Исследования проводились методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией.

Для учета влияний различий в пробоподготовке между ФГУП “ВНИИОФИ” и ФГУП “ВИАМ” на сопоставимость результатов, был произведен обмен приготовленными пробами. Все пробы измерялись в одном цикле.

Проведенные исследования показали, что результаты, полученные с использованием модельных растворов сопоставимы между ФГУП “ВНИИОФИ” и ФГУП “ВИАМ” и соответствуют указанным в паспортах на ГСО значениям. Также применение модельных растворов в качестве образцов сравнения позволяет исключить систематические погрешности определения элементов в легированных сплавах и позволяет снизить погрешность методик измерений до 1 % отн. методом АА и АЭС-ИСП.

Список литературы

1. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
2. Пупышев А.А. Атомно-абсорбционный спектральный анализ. М.: Техносфера. 2009. 784 с.
3. ГОСТ 8.315-97 ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.
4. Ермаченко Л.А., Ермаченко В.М. «Атомно-абсорбционный анализ с графитовой печью: Методическое пособие для практического использования в санитарно-гигиенических исследованиях»/под ред. Л.Г.Подуновой. М.:ПАИМС, 1999.
5. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./ Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр.-СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
6. РМГ 43-2001 Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
7. ГОСТ Р ИСО 5725 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений», ч. 1-6.
8. ГОСТ 8.381-2009 «Эталоны. Способы выражения точности».
9. «Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях», 2-е издание; пер. с англ.-С.-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2002 г.

О ПРОВЕДЕНИИ СЛИЧЕНИЙ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ГЭТ 196-2011

Н.П. Муравская, А.В. Иванов, Я.И. Ермакова

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

В рамках государственных работ по обеспечению единства измерений (Закон №102-ФЗ от 26.06.2008 г.) был создан государственный первичный эталон (ГПЭ) единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонента в жидких и твердых веществах и материалах на основе спектральных методов (ГЭТ 196-2001), который позволяет решать вопросы поверки и калибровки средств измерений содержания компонентов в жидких и твердых веществах и материалах различных предприятий промышленности, контроля метрологических характеристик при проведении их испытаний; метрологической аттестации методик измерений (МИ) и контроля их характеристик погрешности в процессе применения МИ.

Для эффективной работы эталона требуется периодическое подтверждение его измерительных способностей, как на национальном, так и на международном уровнях. Поэтому проведение и участие в ключевых международных и пилотных сличениях является обязательной частью работы эталона.

Первичный эталон ГЭТ 196-2011 принял участие в двух сличениях: международные пилотные сличения КОOMET 562/RU/12 «Пилотные сличения в области измерения массовой доли металлов в пробах металлургического шлака» и двусторонние сличения «Измерение массовой доли чистого железа». В докладе приведены краткое описание прошедших сличений и анализ полученных результатов.

В 2013 г. были организованы и проведены пилотные сличения КОOMET 562/RU/12, пилотом выступил ФГУП «УНИИМ» г. Екатеринбург.

Цель пилотных сличений

Установление сопоставимости результатов измерений массовой доли металлов (Fe, Cu, Ni, Zn) в пробах металлургического шлака между участниками сличений.

Участники сличений

УНИИМ (Россия), ВНИИМ (Россия), ВНИИОФИ (Россия), ГП Укрметртестстандарт (Украина), БелГИМ (Республика Беларусь), Национальное агентство по стандартам, техническим регламента и метрологии (Грузия), ГНУ «Институт порошковой металлургии» (Республика Беларусь), РУП «Белорусский металлургический завод» (Республика Беларусь).

Образец для сличения состава металлургического шлака подготавливался ФГУП УНИИМ. Материал образца: однородный образец металлургического шлака, размер частиц не более 150 мкм. Образец металлургического шлака массой 100 г. упакован в стеклянную банку из темного стекла с завинчивающейся крышкой.

Обсчет результатов велся пилотами сличений: ФГУП УНИИМ.

Также в 2013 году ГЭТ 196-2011 принял участие в двусторонних сличениях. Целью сличений было установление сопоставимости результатов измерений массовой доли чистого железа между ФГУП «УНИИМ» и ФГУП «ВНИИОФИ». Образцами для сличений являлись гранулы железа (ГСО 9497-2009).

Аналитическое оборудование, использованное участниками сличений

ФГУП «ВНИИОФИ»: Государственный первичный эталон ГЭТ 196-2011; Атомно-абсорбционный спектрометр Квант-Z.Эта (ООО «Кортэк»), зав. № 501 № Госреестра 14981-06.

ФГУП «УНИИМ»: Государственный первичный эталон единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонента в жидких и твердых веществах и материалах на основе кулонометрии ГЭТ 176-2013.

По итогам сличений можно сделать следующие выводы:

- Первичный государственный эталон ГЭТ 196-2011 в ходе сличений подтвердил свои измерительные возможности в области измерения примесей в металлургическом шлаке и чистом железе;
- поскольку разброс результатов по никелю в металлургическом шлаке превысил заявленные значения расширенных неопределенностей участников, ФГУП «УНИИМ» принял решение о проведении второго этапа сличений, в которые кроме новых элементов повторно войдет и никель. ФГУП «ВНИИОФИ» подтвердил свое участие в продолжении пилотных международных сличениях по определению массовой доли элементов в металлургическом шлаке. Пилотом является ФГУП «УНИИМ».
- было принято решение в продолжение участия в сличениях по измерению состава чистых веществ. В 2015 году ФГУП «ВНИИОФИ» подтвердил свое участие в пилотных международных сличениях по определению массовой доли основного компонента в чистой меди, пилотом которых стал ФГУП «УНИИМ».

Список литературы

1. Спектральный анализ чистых веществ, под ред. Х. И. Зильберштейна, Л., 1971.
2. Основы количественного спектрального анализа руд и минералов, 2 изд., М., 1978.
3. Терек Т., Мика Й., Гегуш Э., Эмиссионный спектральный анализ, пер. с англ., ч. 1-2, М., 1982.
4. ГОСТ 8.315-97 ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.
5. Ермаченко Л.А., Ермаченко В.М. «Атомно-абсорбционный анализ с графитовой печью: Методическое пособие для практического использования в санитарно-гигиенических исследованиях»/под ред. Л.Г.Подуновой. М.:ПАИМС, 1999.
6. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./ Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр.-СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
7. РМГ 43-2001 Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
8. ГОСТ Р ИСО 5725 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений», ч. 1-6.
9. ГОСТ 8.381-2009 «Эталоны. Способы выражения точности».
10. «Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях», 2-е издание; пер. с англ.-С.-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2002 г.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

¹В.А.Длугунович, ¹А.В.Исаевич, ¹С.В.Никоненко, ¹А.В.Холенков,
²С.В.Тихомиров, ²А.И.Глазов, ²А.Б.Светличный, ²М.Л. Козаченко
³А.В. Галыго

¹Институт физики НАН Беларуси, г. Минск

²ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва,

³РУП «БелГИМ», г. Минск

Для хранения, воспроизведения и передачи единицы средней мощности, ослабления и длины волны излучения, используемого в волоконно-оптических системах связи и передачи информации (ВОСП), а также для поверки и калибровки вторичных и рабочих эталонов, применяемых в ВОСП, в Институте физики НАН Беларуси, при участии ВНИИОФИ в рамках выполнения научно-технической подпрограммы «Эталоны Беларуси» государственной научно-технической программы «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» в 2011 – 2014 гг. разработан и создан Национальный эталон единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для ВОСП.

Эталон состоит из комплекса стабилизированных источников оптического излучения с волоконно-оптическим выходом, эталонной калориметрической системы для воспроизведения и передачи единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП (ЭКВСМ), комплекса средств измерений (СИ) для воспроизведения и передачи единицы ослабления в ВОСП, комплекса СИ для воспроизведения и передачи единицы длины волны оптического излучения в ВОСП и вспомогательной аппаратуры для обеспечения функционирования эталона и обработки информации.

В качестве источников излучения используются одномодовые и многомодовые стабилизированные лазеры с длинами волн 655, 850, 1310, 1490, 1550 и 1625 нм. Стабилизация выходных характеристик лазерного излучения осуществляется за счет поддержания постоянной температуры лазеров с помощью термоэлектрических охладителей и использования специальных схем стабилизации.

ЭКСВСМ функционально состоит из калориметрического преобразователя, систем регистрации и электрической калибровки калориметрического преобразователя, метеоскопа для измерений температуры, давления и влажности окружающей среды и персонального компьютера (ПК) для управления ЭКСВСМ и обработки результатов измерений. Основой ЭКСВСМ является эталонный первичный калориметрический измерительный преобразователь средней мощности оптического излучения для ВОСП – ПСМ.ПМ производства ВНИИОФИ [1]. Все составные части ЭКСВСМ могут работать как автономно, так и под управлением компьютера. Программа работы ЭКСВСМ обеспечивает несколько алгоритмов работы с различными оптическими системами.

Воспроизведение и передача единицы ослабления к вторичным, рабочим эталонам и СИ (фотоэлектрическим ваттметрам с широким динамическим диапазоном) проводится путем нормирования их градуировочной характеристики, а мерам затухания (оптическим аттенюаторам) – методом прямых измерений с использованием фотоэлектрического ваттметра с широким динамическим диапазоном и известной градуировочной характеристикой. Нормирование градуировочной характеристики производится методом «сложения света». Комплекс СИ для воспроизведения единицы ослабления в ВОСП состоит из перестраиваемых одномодовых аттенюаторов FVA-3150-B-EI-EUI-89, перестраиваемых многомодовых аттенюаторов FVA-3150-C-EI-EUI-89, фотоэлектрических ваттметров с широким динамическим диапазоном ОЭП-2 и установки для

измерения нелинейности градуировочной характеристики приемников оптического излучения.

Комплекс СИ для воспроизведения единицы длины волны лазерного излучения в ВОСП включает прецизионный измеритель длины волны WS-U фирмы Angstrom, калибруемый с помощью одночастотного лазера Clarity-NLL-1541-HP и спектроанализатор модели 721В фирмы Bristol для измерения спектрального распределения интенсивности оптического излучения и длин волн лазеров в спектральном диапазоне от 520 до 1680 нм.

Проведенные метрологические исследования показали, что эталон обеспечивает воспроизведение единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП на фиксированных длинах волн в спектральном диапазоне от 650 до 1700 нм с относительной расширенной неопределенностью ($k = 2, P = 95 \%$) не более 0,13 % в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ Вт и 2,7 % в диапазоне от $1 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ Вт, воспроизведение единицы ослабления оптического излучения в ВОСП в диапазоне от 0,05 до 60,00 дБ с расширенной неопределенностью ($k = 2, P = 95 \%$) не более 0,09 дБ, воспроизведение единицы длины волны оптического излучения для ВОСП в спектральном диапазоне от 650 до 1700 нм на фиксированных длинах волн 655, 852, 1309, 1489, 1548 1627 нм с относительной расширенной неопределенностью ($k = 2, P = 95 \%$) не более $1,2 \cdot 10^{-5} \%$.

Проведенные в рамках КОOMET в 2012 – 2013 гг. трехсторонние дополнительные сличения эталонов ВОСП по единице чувствительности мощности оптического излучения для ВОСП между БелГИМ (Беларусь), РТВ (Германия) и ВНИИОФИ (Россия) по теме PR-S6.2012, показали, что созданный эталон для ВОСП соответствует по основным метрологическим характеристикам эталонам ведущих национальных метрологических центров.

Список литературы

1. Эталонная калориметрическая система для воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП/ Глазов А.И. и [др.] /Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.: дополнительные тезисы докладов 4-й секции, Москва, 16-19 апреля 2013 г. – М.: Логос. С. 21 – 23.

СИСТЕМА СРАВНЕНИЙ ШКАЛ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

С.С. Донченко, О.В. Колмогоров, Д.В. Прохоров

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево

Одной из основных задач, решаемых при создании средств метрологического обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС в целях достижения заданных требований к ее точностным характеристикам, является разработка высокоточных систем сравнения и синхронизации шкал времени комплексов метрологического обеспечения и контроля характеристик ГНСС ГЛОНАСС. Для обеспечения сравнений шкал времени двух пространственно удаленных объектов с погрешностью не более 0,1 нс в работе [1] предложена схема системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ) с использованием волоконно-оптической линии связи.

В данном докладе представлены результаты испытаний и оценки точностных характеристик макета СОДС ШВ. Структурная схема СОДС ШВ приведена на рис. 1. С помощью СОДС ШВ сравниваются шкалы времени ШВ 1 и ШВ 2, реализованные в виде физических сигналов 1 PPS_1 и 1 PPS_2 . Для проверки точности СОДС ШВ используется контрольный измеритель интервалов времени Контр. ИВИ.

Генератор импульсов (ГИ) формирует и подает на лазерный модуль (Л) последовательность электрических импульсов с частотой 1 Гц, причем положение каждого i -го импульса не синхронизировано относительно ШВ 1 и ШВ 2. Оптический импульс лазерного модуля поступает в оптический разветвитель (Р), где разделяется на два канала, по одному каналу поступает в фотоприемник ФП 2, а по второму - через циркулятор (Ц) поступает в оптоволоконную линию (ОВ). С помощью измерителя интервалов времени ИВИ 2 определяется момент излучения импульса в шкале времени первого

объекта (T_i^{I1}) как интервал между импульсом 1 PPS₁ и i -м импульсом, поступившим с ФП 2. Импульс, прошедший по оптоволоконной линии, через полупрозрачное зеркало (ППЗ) поступает на фотоприемник второго объекта (ФП 3) с усилителем (У), где с помощью измерителя временных интервалов ИВИ 3 фиксируется момент прихода импульса в шкале второго объекта (T_i^{II}).

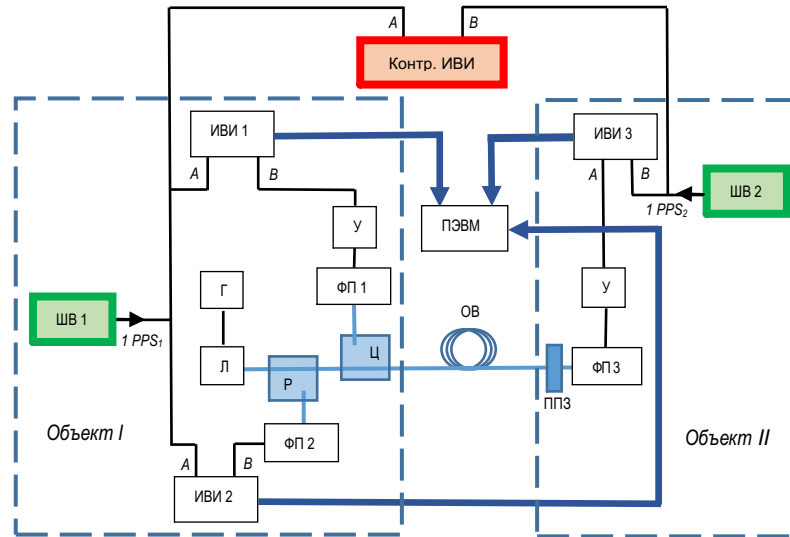


Рис. 1. Схема СОДС ШВ, подключенной к средствам контроля

Отраженный от ППЗ оптический импульс проходит по той же самой оптоволоконной линии (ОВ) и поступает через циркулятор (Ц) на фотоприемник первого объекта (ФП 1) с усилителем (У), где с помощью измерителя временных интервалов (ИВИ 1) фиксируется время прихода отражённого импульса в шкале времени первого объекта (T_i^{I2}). На основании полученных результатов измерений, переданных с ИВИ 1, ИВИ 2, ИВИ 3 на ПЭВМ, рассчитывается расхождение шкал времени объектов ΔT по формуле:

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(T_i^{II} - \frac{T_i^{I1} + T_i^{I2}}{2} \right) + \tau_3,$$

(1)

где n – количество оптических импульсов в одном цикле измерений;

τ_3 – поправка для учета задержек в аппаратуре.

Результаты измерений расхождения шкал времени, полученные

с помощью СОДС ШВ и с помощью контрольного ИВИ, приведены на рис. 2. СКО результатов измерений расхождения шкал времени системой СОДС ШВ составило 64 пс, а СКО результатов измерений контрольным ИВИ 62 пс.

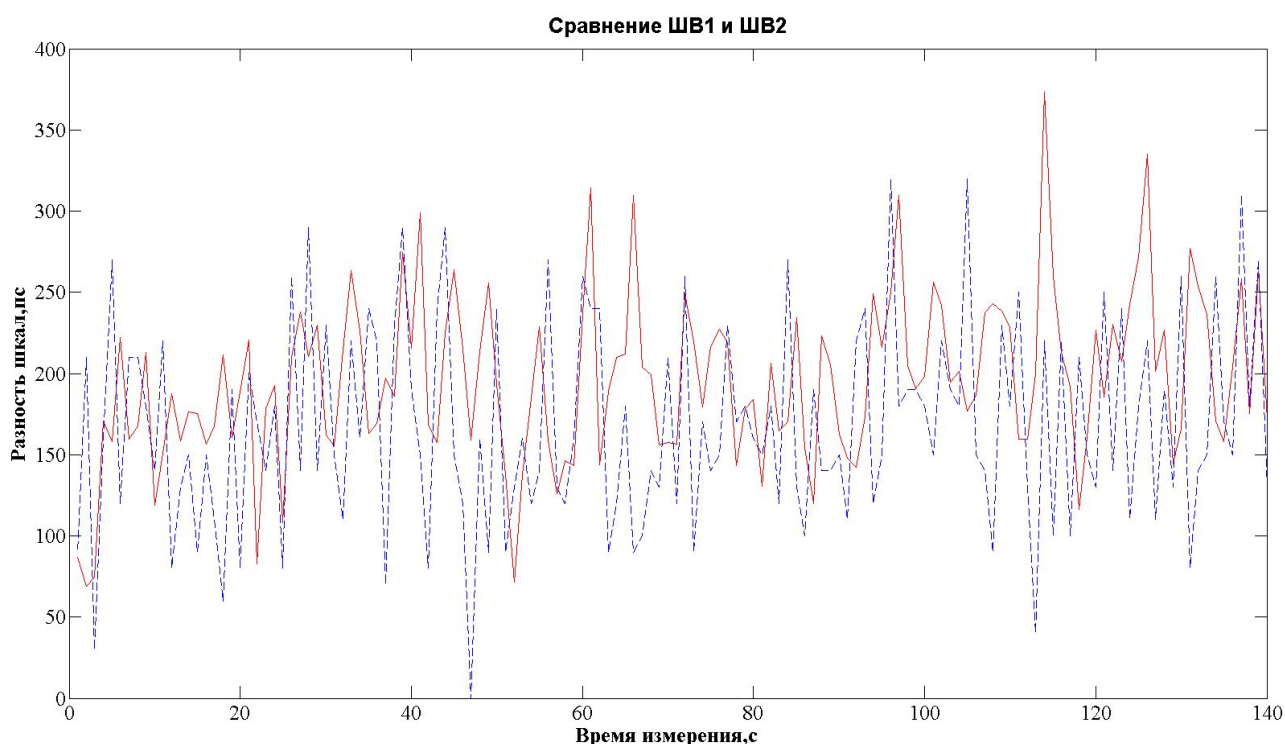


Рис. 2. Результаты измерений расхождения шкал времени, полученные с помощью СОДС ШВ (сплошная линия) и контрольного ИВИ (пунктирная линия)

При оценке составляющих погрешности макета СОДС ШВ установлено, что НСП не превышает 55 пс, а абсолютная погрешность (при доверительной вероятности 0,95) не превышает 140 пс. Также выявлено, что за счет использования более точных ИВИ можно достичь повышения точности СОДС ШВ. Таким образом, по результатам экспериментальных исследований подтверждена работоспособность выбранной схемы СОДС ШВ и ее метрологические характеристики.

Список литературы

1. С.С. Донченко, О.В. Колмогоров, Д.В. Прохоров. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника, № 1, 2015.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

И.С. Королёв, С.В. Тихомиров, Н.П. Хатырев

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Волоконно-оптические системы передачи информации (ВОСПИ) являются наиболее востребованной технологией передачи цифровых данных.

Цифровой информационный поток в ВОСПИ передается с помощью динамического оптико-физического процесса, отображающего последовательность логических нулей и единиц [1]. Параметры импульсно-модулированного излучения, являющегося изображением логических символов, близки к динамическим характеристикам лазерного излучения, регламентируемым Государственной поверочной схемой ГОСТ 8.198-85, возглавляемой Государственным Первичным эталоном ГЭТ 90-85 [2].

Измерения многочисленных динамических характеристик импульсного лазерного излучения настолько сложны, что возможны лишь в условиях специализированных лабораторий. Поэтому созданы специализированные средства измерений для ВОСПИ, которые могут эксплуатироваться как в аппаратных помещениях, так и в полевых условиях. В подавляющем большинстве случаев эти средства обеспечивают измерения и отображение на дисплее базовой величины – скорости передачи информации. Значения этой величины необходимы для измерений коэффициентов ошибок и фазового дрожания, которые нужны для тестирования ВОСПИ [3].

Измерения скорости передачи информации связаны с широким набором характеристик импульсной последовательности и применяемого средства измерений. Большое значение имеют длительность импульса, длительность переднего и заднего фронта импульса, амплитуда импульса и некоторые другие. Единицей измерения скорости передачи информации является 1 Бит в секунду. Эта единица относится к числу внесистемных единиц величин

допускаемых к применению в Российской Федерации [4].

В высокоскоростных ВОСПИ используются синхронные способы передачи, такие как синхронная цифровая иерархия (СЦИ) и Ethernet. Для них характерны фиксированные с высокой точностью значения скоростей передачи [5, 6]. Динамический диапазон измерений при этом весьма узкий и ограничивается допустимыми при эксплуатации ВОСПИ отклонениями скорости от номинального значения. Для систем с синхронной цифровой иерархией этот диапазон не превышает $\pm 0,01$ % от номинального значения. Следует отметить, что погрешность измерений скорости передачи информации мала. Обычно она не превышает 0,001 % [7].

Измерения скорости передачи, а, следовательно, и метрологическое обеспечение таких измерений с помощью универсальных оптико-физических средств измерений невозможны. Основная проблема заключается в том, что используемые последовательности импульсов хотя и являются повторяющимися, но не являются периодическими. Задача метрологического обеспечения измерений параметров сверхкоротких лазерных импульсов и соответствующих приемных устройств, при случайном характере последовательности, не решается и упомянутым выше эталоном ГЭТ 90-85. Метрологическое обеспечение измерений подразумевает необходимость воспроизведения единицы скорости передачи информации при случайном характере импульсной последовательности при соблюдении требований рекомендаций ИТУ-Т к тактовой частоте и форме импульсов [8]. Единица скорости передачи информации должна воспроизводиться в виде псевдослучайной последовательности (ПСП) оптических импульсов с прецизионно заданной тактовой частотой.

Авторами впервые предложено использовать для измерений скорости передачи такой класс вспомогательных устройств, как системы восстановления тактовой частоты. Они производятся мелкими партиями, но предназначены для систем синхронизации другого измерительного оборудования, например – стробоскопических осциллографов. В процессе

работы исследованы погрешности измерений скорости передачи информации с помощью установки на основе системы восстановления тактовой частоты сигнала Agilent N4877A. Эксперименты проводились с помощью установки, схема которой приведена на рисунке 1. К оптическому выходу источника ПСП оптических импульсов подключен волоконный делитель, направляющий часть излучения на оптический вход стробоскопического осциллографа, а часть – на высокоскоростной фотоприемник. Электрический выход фотоприемника соединен со входом системы восстановления тактовой частоты, один из выходов которой высокочастотным коаксиальным кабелем подключен ко входу внешней синхронизации осциллографа, а другой – ко входу частотомера. Оптический сигнал, воспроизводимый моделью генератора ПСП, разделяется в пропорции 50:50, измеряется с помощью осциллографа, синхронизируемого посредством сигнала восстановленной тактовой частоты, параметры которого, в свою очередь, фиксируются частотомером Pendulum CNT-91R.

Эксперименты проводились с использованием цифрового интерфейса Ethernet 10G LAN (10,3125 Гбит/с).

В качестве источника ПСП использовалась система FTB-500 производства компании EXFO (Канада) с модулем анализатора транспортных протоколов стандарта 100G Ethernet FTB-85100G, позволяющим осуществлять генерацию сигнала с номинальной скоростью 103,125 Гбит/с состоящего из 10 информационных потоков на отдельных оптических несущих (система с грубым спектральным уплотнением, CWDM). Прибор обеспечивает возможность перестройки скорости передачи информации воспроизводимого сигнала ПСП в диапазоне от $-0,012\%$ до $+0,012\%$ относительно номинального значения.

В эксперименте использовался сигнал ПСП длиной $2^{23}-1$, генерируемый только на одной длине волны (номинальная скорость передачи 10,3125 Гбит/с). Скорость передачи задавалась в диапазоне от $-0,012\%$ до $+0,012\%$ от номинального значения с шагом $0,002\%$ (206250 бит/с). Скорость

передачи, однозначно связанная с тактовой частотой, измерялась с помощью системы, включающей Agilent N4877A, высокоскоростной фотоприемник и прецизионный частотомер (см. рис. 1). Среднее измеренное значение шага изменения скорости передачи информации, составило 206250 бит/с, что практически совпадало с устанавливаемым значением. Измеренные абсолютные значения скорости передачи информации, задаваемые источником ПСП, отличаются в среднем на 10194 бит/с (менее чем на $1 \cdot 10^{-6}$) от измеренной восстановленной тактовой частоты.

Кроме того для определения инструментальной погрешности системы восстановления тактовой частоты на ее вход подавали периодические последовательности прямоугольных электрических импульсов, имитирующие телекоммуникационные сигналы со скоростью 51,840 Мбит/с (интерфейс STM-0 СЦИ), 100 Мбит/с, 155,22 Мбит/с (интерфейс STM-1 СЦИ) и 622,080 Мбит/с (интерфейс STM-4 СЦИ). Результаты, полученные по итогам измерений, длительностью 10^4 с приведены в таблице 1:

Таблица 1: Результаты измерений инструментальной погрешности системы восстановления тактовой частоты

Номинальная скорость передачи информации, бит/с,:	51840000 (STM-0)	100000000	155220000 (STM-1)	622080000 (STM-4)
Вид последовательности	1010	1010	1000	01111111 11111111
Отклонение от номинальной скорости, бит/с:	0,007 ($1,35 \cdot 10^{-10}$)	0,003 ($3 \cdot 10^{-11}$)	0,03 ($1,93 \cdot 10^{-10}$)	0,14 ($2,25 \cdot 10^{-10}$)
Разброс значений скорости, бит/с:	2,18 ($4,21 \cdot 10^{-8}$)	0,37 ($3,7 \cdot 10^{-9}$)	1 ($6,44 \cdot 10^{-9}$)	3,4 ($5,47 \cdot 10^{-9}$)
Среднеквадратическое отклонение (СКО), бит/с:	0,035 ($6,75 \cdot 10^{-10}$)	0,05 ($5 \cdot 10^{-10}$)	0,09 ($5,8 \cdot 10^{-10}$)	0,53 ($8,52 \cdot 10^{-10}$)
Отклонение (девиация) Аллана, бит/с:	0,033 ($6,37 \cdot 10^{-10}$)	0,046 ($4,6 \cdot 10^{-10}$)	0,09 ($5,8 \cdot 10^{-10}$)	0,48 ($7,72 \cdot 10^{-10}$)

Результаты независимых экспериментов, проведенных с различными источниками ПСП демонстрируют высокую стабильность воспроизведения и измерений скорости передачи информации. Достижимые значения погрешности измерений скорости передачи информации с помощью системы восстановления тактовой частоты (менее $3,5 \cdot 10^{-8}$) значительно лучше, чем погрешности, приписываемые наиболее точным рабочим средствам измерений ($3 \cdot 10^{-6}$ и более).

Полученные результаты делают возможным построение эталонной установки для воспроизведения и передачи единицы скорости передачи информации в оптическом тракте на основе технических решений, использованных при проведении экспериментов. Также большой запас по точности (около двух порядков) позволяет создать эталонные средства уровня рабочих эталонов, особенно востребованные в условиях большой географической протяженности нашей страны и широкого распространения ВОСПИ на всей территории.

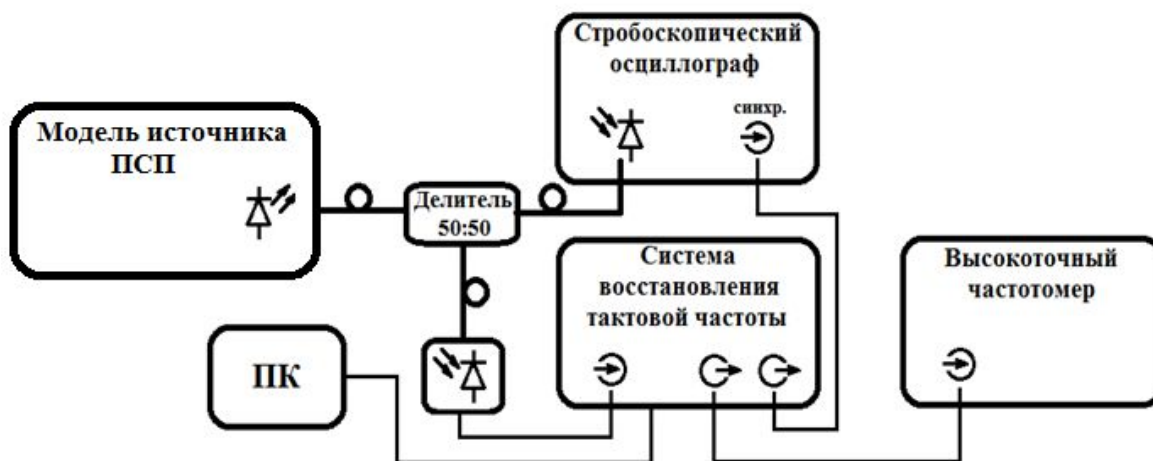


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для воспроизведения и передачи единицы скорости передачи информации.

Список литературы

1. ITU-T Recommendation G.692, Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers, TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR OF ITU (10/98)

ГОСТ 8.198-85 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения мощности и динамических параметров приемников импульсного лазерного излучения в диапазоне длин волн от 0,4 до 10,6 мкм. Государственный комитет СССР по стандартам, Москва, 1986.

2. Dave M. Spirile. Andrew D. Ellis. Peter E. Barnsley. Optical Time Division Multiplexing Systems and Networks. IEEE Communication Magazine, December, 1999.

3. Постановление Правительства РФ от 31 октября 2009 г. № 879 “Об утверждении Положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации”

4. IEEE 802.3: Ethernet

5. ITU-T Recommendation G. 957. Optical interfaces for equipment and systems relating to the synchronous digital hierarchy.

6. Н. Н. Слепов. Синхронные цифровые сети SDH. Москва. 1997.

7. В. А. Докучаев, В. К. Серебренников. Совершенствование транспортных сетей SDH. Журнал Электросвязь, № 9, 2003, стр. 5-9.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДУНАРОДНЫХ СЛИЧЕНИЙ В ОБЛАСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А.И. Глазов, В.В. Григорьев, В.Е. Кравцов, А.Б. Светличный,

С.В. Тихомиров

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

С целью обеспечения единства и достоверности результатов измерений в области волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) ВНИИОФИ проводит работы по сличениям разработанных эталонов с рядом ведущих национальных метрологических институтов.

Такие работы начались уже с 90-х годов на базе утвержденных ранее установок высшей точности (УВТ). С применением разработанного во ВНИИОФИ эталонного калориметрического приемника оптического излучения с электрическим замещением в 1999 -2001 г.г. были проведены двусторонние сличения (неофициальный статус сличений) по средней мощности оптического излучения для ВОСП с РТВ, Германия и NIST, США. Сличения показали хорошее совпадение результатов измерений (различие значений между ВНИИОФИ и NIST - в пределах 0,4%) [1].

После создания и утверждения Государственных первичных специальных эталонов (ГПСЭ) ГЭТ 170-2011 (эталонный комплекс по ряду основных параметрам ВОСП), ГЭТ-184-2010 (эталон единицы хроматической дисперсии) и ГЭТ-185-2010 (эталон единицы поляризационной модовой дисперсии) ВНИИОФИ начал работу по международным дополнительным сличениям, имеющим официальный статус.

В 2009 г. ВНИИОФИ присоединился к дополнительным сличениям по средней мощности (fiber optic power responsivity supplementary comparisons) для ВОСП (ГПСЭ ГЭТ 170-2011) в рамках Азиатско-Тихоокеанского регионального комитета APMR по проекту APMR Project PR-S2 (9 участников, пилот KRISS, Корея). В сличениях принимали участие

такие страны как Япония, Китай, Австралия, Сингапур. В качестве артефакта использовался фотометр KRISS. Полученные в результате сличений отклонения результатов ВНИИОФИ от средневзвешенного значения (degree of equivalence) не превысили 0,2 % для длин волн 1310 нм and 1550 нм. Финальный отчет по сличениям, предварительно рассмотренный ССРР, находится в стадии публикации.

Одновременно с 2012 г. по проекту KOOMET 577/RU/2012 PR-S6 проводились дополнительные сличения в области измерений средней мощности для ВОСП (ГПСЭ ГЭТ 170-2011). В проекте участвовали Белгим (Беларусь), РТВ (Германия), ВНИИОФИ (Россия). Пилотом проекта являлся ВНИИОФИ. В качестве артефакта использовалось фотоприемное устройство ВНИИОФИ на основе шарового фотометра и прецизионного регистратора [2]. Полученные в результате сличений различие полученных значений чувствительности для всех трех участников не превысило 0,5% [3].

Результаты работ в области измерений средней мощности для ВОСП являются основанием для последующего включения в таблицу калибровочных возможностей (СМС).

Для подтверждения характеристик ГПСЭ единиц хроматической и поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне (ХД и ПМД), разработанных во ВНИИОФИ в 2010 г., были начаты соответствующие работы по сличениям. При этом в части хроматической дисперсии (ГПСЭ ГЭТ 184-2010) были организованы и проведены дополнительные двусторонние сличения по проекту EURAMET PR-S3 (пилот- METAS, Швейцария) на основе артефакта ВНИИОФИ. Работы по проекту явились продолжением работ ЕВРАМЕТ с целью привязки к результатам проведенных ранее сличений среди 7 участников, в том числе, NIST и METAS. Анализ результатов сличений показал, что полученные значения ХД лежат в пределах неопределенности результатов сличений (отклонение от опорного значения - не более 0,2 пс/нм при расширенной неопределенности результатов сличений 0,64 пс/нм) [4].

В продолжение работ по сличениям с 2015 г. начаты дополнительные сличения по единице длины (ГПСЭ ГЭТ 170-2011) для оптического волокна (на основе определения времени распространения излучения в волокне). Сличения проводятся в рамках проекта APMR PR-S8 -пилот - KRISS (Корея).

Кроме того, с рядом национальных метрологических институтов обсуждается возможность проведения с 2016 г. дополнительных сличений по поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне (ГПСЭ ГЭТ 185-2010) и по единице длины волны для ВОСП (ГПСЭ ГЭТ 170-2011).

Полученные результаты подтверждает заявленные метрологические характеристики перечисленных выше эталонов и сопоставимость их с метрологическими характеристиками эталонной аппаратуры METAS и других национальных метрологических институтов.

Авторы выражают благодарность за поддержку и проведение работ по сличениям Б.Б. Хлевному (ВНИИОФИ) и коллегам из Belgim -A. Galygo, из KRISS- S.K. Kim, из PTB -S. Kück, из METAS -J Morel, из NIST -I. Vaishenker.

Список литературы

1 S.V. Tikhomirov, A.I. Glasov., M.L.Kozatchenko, V.E Kravtsov., A.B Svetlichny, I. Vayshenker., T.R Scott., D.I Franzen., *Metrologia*, 37, pp. 347-348, 2000.

2. А.И. Глазов, А.Б. Светличный, С.В. Тихомиров, 19 Научно-техническая конференция «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», Тезисы докладов, 2013, стр. 19-20.

3 A. Svetlichny, V. Kravtsov, S.Kück, H. Hofer and A. Galygo, Final Report on COOMET Supplementary Comparison on Fiber Optic Power Responsivity COOMET.PR-S6.2012, 2014 *Metrologia* 51, 02003.

4 Morel J., V Kravtsov and V Grigoriev: Final report on EURAMET.PR S3: Bilateral intercomparison of measurements of chromatic dispersion reference fibres between METAS and VNIIOFI, *Metrologia* 50, 2013, Tech. Suppl. 02001.

МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ЭТАЛОННЫХ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

А.П. Фокин¹, К.Б. Савкин¹, С.В. Тихомиров²

¹ **ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи Московской обл.**

² **ФГУП «ВНИИОФИ», Москва**

При сличении шкал времени (ШВ) эталонов единиц времени и частоты, удаленных друг от друга на расстояния от нескольких единиц до сотен километров, целесообразно использовать волоконно-оптические линии (ВОЛ), т.к. точность передачи эталонных сигналов по оптическому каналу гораздо выше любых других каналов передачи, в том числе, атмосферных, космических и основанных на использовании перевозимых квантовых часов.

При передаче эталонных сигналов времени (ЭСВ) по ВОЛ необходимо с достоверной точностью в каждый момент знать величину временной задержки сигнала в канале. Чем длиннее канал, тем больше эта величина и тем большее возможные ее изменения во времени при изменении внешних факторов. Основным внешним фактором, влияющим на изменение временной задержки ЭСВ, будет изменение температуры ВОЛ, как на длительных, так и на коротких интервалах времени. Для обеспечения высокой точности передачи ЭСВ необходимо компенсировать изменение временной задержки сигнала в ВОЛ, для чего существует несколько вариантов систем компенсации [1-4], среди которых можно выделить электронные и оптоэлектронные, в которых применяются соответственно электронные и оптические линии задержки, управляющее воздействие на которые формируются при передаче ЭСВ по ВОЛ «туда и обратно». Однако линии задержки обладают рядом недостатков, среди которых можно выделить малое быстродействие и узкий диапазон регулирования временной задержки.

С целью обеспечения сличений ШВ удаленных эталонов единиц времени и частоты с точностью менее 1 нс и широким диапазоном

регулировки времени задержки сигнала был разработан новый метод передачи ЭСВ по ВОЛ с использованием трехпроходной системы компенсации времени задержки сигнала в оптическом канале.

Предложенный метод передачи ЭСВ по ВОЛ от Источника к Приемнику (рисунок 1) основан на непрерывном измерении времени задержки Δt сигнала, переданного по ВОЛ напрямую от Источника к Приемнику, относительно этого же сигнала, прошедшего дополнительный путь от Приемника к Источнику и обратно. Измеренное Приемником время прихода сигнала от Источника ($T + \Delta t$), а также вычисленное время задержки сигнала в ВОЛ Δt позволяет на стороне Приемника получить ЭСВ Источника T .

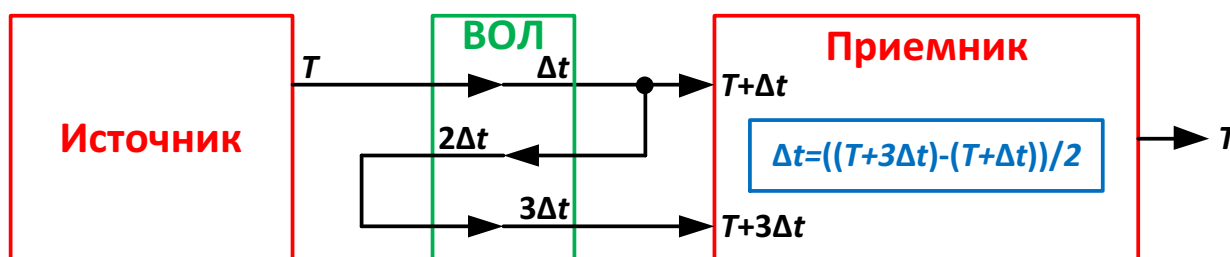


Рисунок 1 – Упрощенная схема метода передачи ЭСВ по ВОЛ

При этом, проведение непрерывных измерений времени задержки сигнала на стороне Приемника позволяет учитывать как медленные, так и быстрые колебания длины оптического канала, связанные с изменениями внешних факторов (суточными и сезонными изменениями температуры волокна, вибрациями, оптическими потерями и др. факторами).

В докладе раскрыты варианты физической реализации предложенного метода, в том числе при организации на стороне Приемника как аналитической, так и физической ШВ Источника на основе использования современных быстродействующих измерителей временных интервалов (ИВИ).

Точность передачи ЭСВ новым методом зависит от точностных

характеристик используемых ИВИ, а так же от точности определения постоянных временных задержек распространения ЭСВ в элементах всей системы передачи.

Предложенный метод передачи ЭСВ по ВОЛ в настоящее время апробируется на соответствующем макете экспериментальной установки. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о достижимой точности передачи ЭСВ на расстояние до 100 км 0,5 нс и лучше.

Таким образом, разработан новый метод передачи ЭСВ на большие расстояния с использованием ВОЛ, позволяющий обеспечить сличение ШВ удаленных эталонов единиц времени и частоты в непрерывном режиме с требуемым уровнем точности, а также широкий круг других применений в различных областях науки и техники, где требуются эталонные сигналы времени.

Список литературы

1. Wang B. [et al.] Precise and Continuous Time and Frequency Synchronisation at the $5 \cdot 10^{-19}$ Accuracy Level // Sci. Rep. - 2012. - 2. - pp. 556-560. - DOI:10.1038/srep00556.
2. Śliwczyński Łukasz, Krehlik Przemysław and Lipiński Marcin, Optical fibers in time and frequency transfer // Meas. Sci. Technol. – 2010. – 21. – 11 pp. - doi:10.1088/0957-0233/21/7/075302.
3. Miho Fujieda, Motohiro Kumagai, Shigeo Nagano, Atsushi Yamaguchi, Hidekazu Hachisu and Tetsuya Ido, All-optical link for direct comparison of distant optical clocks // Optics Express. - Vol. 19. - No. 17. - pp. 16498-16507.
4. Olivier Lopez, Amale Kanj, Paul-Eric Pottie, Daniele Rovera, Joseph Achkar, Christian Chardonnet, Anne Amy-Klein and Giorgio Santarelli, Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network // arXiv.org. 2012.

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА
КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ОСНОВЕ
ОПТИМАЛЬНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

О.А. Гарин, А. А. Жирнов, К. В. Степанов, А. С. Хаперский, Е. Т.

Нестеров, А. Б. Пнёв

МГТУ им. Н. Э. Баумана, НОЦ «Фотоника и ИК-техника», Москва

Направление когерентной рефлектометрии сейчас очень активно развивается. Приборы, основанные на этом принципе, используются в системах мониторинга мостов, трубопроводов, охраны границ и периметров и т.д.

Данное устройство позволяет регистрировать деформации сенсорного волокна, вызванные преимущественно акустическими колебаниями окружающих объектов [1]. На сегодняшний момент типичная протяжённость сенсора такого прибора 50 км. Эта величина ограничена уровнем мощности излучения, вводимого в линию: из-за проявления нелинейных эффектов не имеет смысла подавать более 400 мВт [2]. Существуют способы увеличения длины сенсора при помощи промежуточных эрбиевых усилителей, но это требует существенного усложнения схемы [3].

Для увеличения длины сенсора предлагаются следующие модификации схемы:

1. Применение фильтра Фабри-Перо (ФФП), позволяющего выделить более узкий спектральный диапазон, что уменьшает влияние шумов предусилителя.
2. Увеличение коэффициента усиления предусилителя вместе с уменьшением мощности, вводимой в волокно. Это позволяет избежать появления нелинейных эффектов, из-за которых в обычной схеме происходит сильное затухание на дальнем конце сенсора.
3. Система подстройки ФФП, компенсирующая нестабильность длины волны лазера и не допускающая выхода его спектра за границы пропускания

фильтра.

Схема представлена на рисунке:

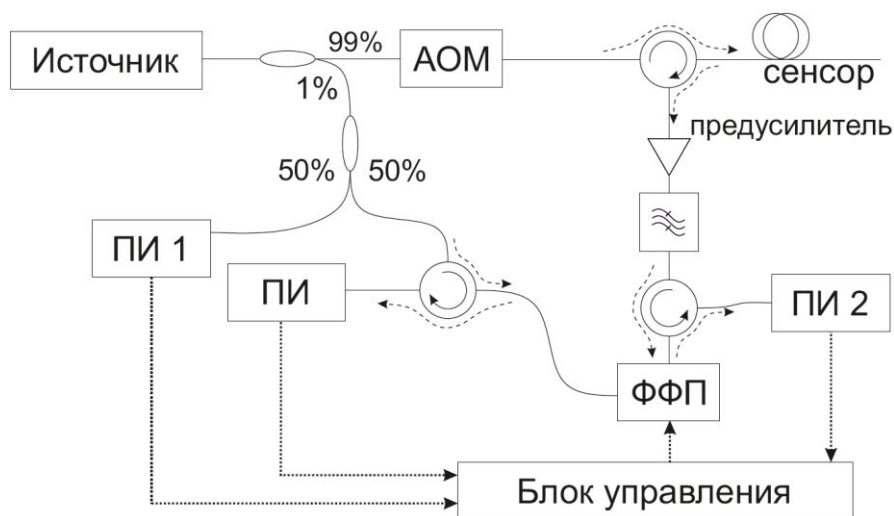


Рисунок 1 – Схема модернизированного прибора

От источника излучение поступает на разветвитель 99 % / 1 %, после которого большая часть излучения поступает на акусто-оптический модулятор (АОМ), преобразующий непрерывное излучение в импульсное, а меньшая – к разветвителю 50% / 50%, после которого одна его часть поступает сразу на приёмник излучения ПИ1, а другая, предварительно пройдя фильтр Фабри-Перо ФФП, на ПИ2. После АОМ излучение через циркулятор сначала направляется в сенсорное волокно, а потом рассеянное назад излучение через циркулятор перенаправляется к приёмному узлу. Он состоит из предусилителя, повышающего мощность оптического излучения, оптического фильтра, убирающего спонтанные шумы, и дополнительного фильтра Фабри-Перо. Далее фотоприёмник преобразует оптический сигнал в электрический, который передаётся к компонентам электронной обработки (находятся в Блоке управления). Добавленный в эту ветвь ФФП позволяет осуществить лучшую спектральную фильтрацию проходящего сигнала, за счёт чего уменьшается уровень спонтанного шума после предусилителя.

Значение отношения уровня мощностей на ПИ1, на который попадает исходное излучение, и ПИ2, на который попадает излучение, прошедшее через ФФП, позволяет отслеживать моменты, когда длина волны лазера

уходит от максимума пропускания фильтра. В такой ситуации Блок управления производит подстройку ФФП, чтобы не допустить уменьшения мощности, поступающей с сенсора на ПИ.

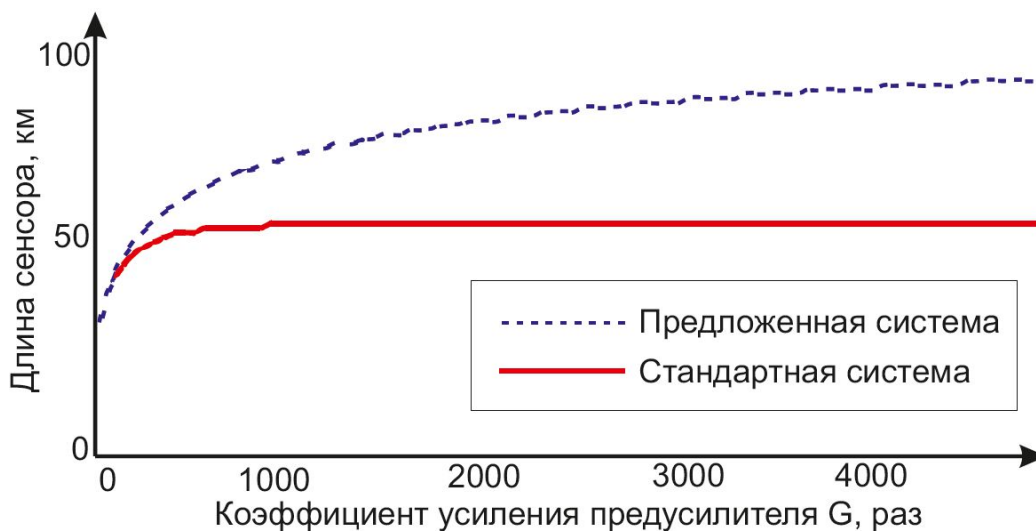


Рисунок 2 – Графики зависимости максимальной длины сенсора

На рисунке 3 представлены графики зависимостей предельной дальности сенсорного участка от коэффициента усиления предусилителя для систем, собранных по ранее известной схеме, и для систем, собранных по предложенной схеме. Видно, что при росте коэффициента усиления предусилителя увеличение дальности сенсорного участка происходит только в системах, собранных по предложенной новой схеме.

Список литературы

1. Taylor H. F., Lee C. E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing : пат. 5194847 США. – 1993.
2. Nesterov E. T. et al. Experimental study of influence of nonlinear effects on phase-sensitive optical time-domain reflectometer operating range //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – Т. 584. – №. 1. – С. 012028.
3. Pnev A. B. et al. Mathematical analysis of marine pipeline leakage monitoring system based on coherent OTDR with improved sensor length and sampling frequency //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – Т. 584. – №. 1. – С. 012016.

ИЗМЕРЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПЛАСТИКОВЫХ СЦИНЦИЛЛЯЦИОННЫХ СВЕТОВОДОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Роднова Ж. Н., Лазарев В. А., Леонов С. О.,

Дворецкий Д. А., Пнев А.Б., Карасик В. Е.

МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва

В настоящее время в физике элементарных частиц получили широкое распространение детекторы на основе сцинтилляционных пластиковых волоконных световодов. Такие детекторы позволяют определять траекторию протонов, рассеянных под очень малыми углами, и позволяют определять абсолютную светимость коллайдеров в точке взаимодействия [1]. С помощью сцинтилляционных детекторов можно измерять энергетические спектры электронов и γ -лучей [2]. Принцип действия сцинтилляционных детекторов основан на свойствах определенных материалов сцинтиллировать при взаимодействии с элементарной частицей. Путем регистрации сцинтилляций можно получить информацию о частице, взаимодействующей с волоконным световодом.

Широко применяемые в настоящее время сцинтилляционные детекторы на основе пластиковых волоконных световодов имеют общую конструктивную особенность, связанную с вертикальным закреплением световода. Вследствие такого закрепления в световодах возникает натяжение, вызванное собственной силой тяжести, что приводит к ослаблению и возможному ухудшению передачи сцинтилляционного сигнала [2, 3]. В этой связи особую актуальность представляет измерение ослабления в сцинтилляционных световодах.

В настоящей работе сообщается о создании установки для измерения ослабления сцинтилляционных световодов в зависимости от величины растяжения, а также его результаты.

На рисунке 1 представлена структурно-функциональная схема установки для исследования ослабления сцинтилляционных световодов.

Световод закрепляется в держателе с трехкоординатным позиционером. Излучение источника – белого лазера с акустооптическим фильтром – проходит через модулятор излучения, фокусируется на вход пластикового световода при помощи объектива. На выходе световода установлен объектив, который собирает излучение на площадке фотоприемного устройства. Фотоприемное устройство подключено к осциллографу, с помощью которого проводится измерение сигнала на выходе исследуемого световода.

Для того, чтобы исключить потери, вызванные рассеянием во внешних оболочках световода и рассматривать только потери в сердцевине световода, в световод вводятся дополнительные изгибные потери. Образцы световодов закрепляются на упорах 1 путем приклеивания их концов к подвижкам с микрометрическим винтом.

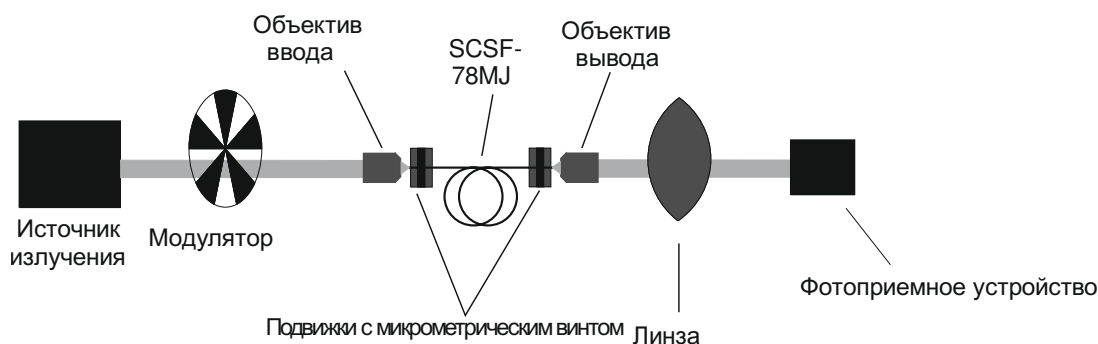


Рис. 1. Структурно-функциональная схема экспериментальной установки для измерения ослабления сцинтилляционных световодов

Излучение, прошедшее световод, регистрировалось фотоприемным устройством. Уровень сигнала определялся с помощью осциллографа. Результаты измерений приведены на рисунке 2.

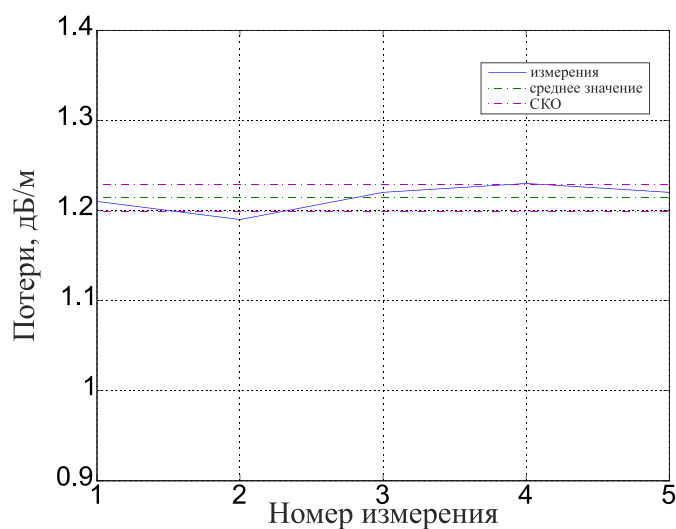


Рис. 2. Результаты измерений потерь для длины волны 437 нм

Разрушающее напряжение при испытании световода по данной схеме было вычислено в работе [4] и определяется по формуле:

где $E = 3000$ МПа – модуль упругости полиметилметакрилата;

$d = 250$ мкм – диаметр образца;

$D = 3,5$ мм – расстояние между зажимными подвижками в момент разрушения.

Растягивающую силу, необходимую для разрушения образца, можно определить согласно выражению:

Таким образом, только при растяжении волокна под действием силы порядка 12,7 Н напряжение, возникающее в образце, станет достаточным для разрушения образца. Критическое удлинение образца длиной 1,75 м, при котором начинается его разрушение, составило 0,6 %. Результаты эксперимента представлены на рис. 3.

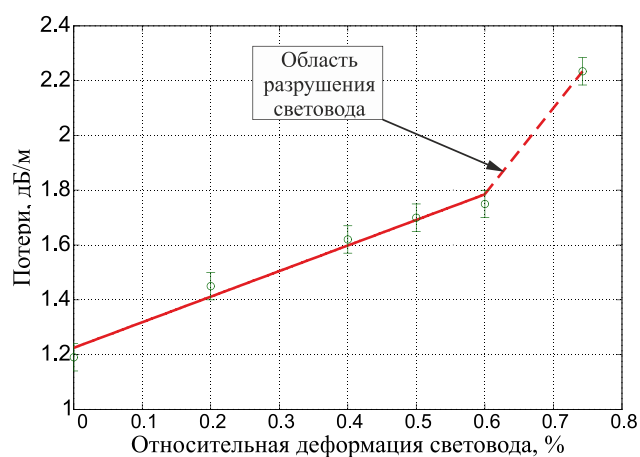


Рис. 3. Зависимость потерь в световоде от растяжения

В ходе эксперимента установлено, что при относительной деформации $\delta = 0,2\%$ (длина световода 1,75 м, удлинение 3,5 мм) ослабление в сцинтилляционном световоде составило 1,4 дБ/м. На пороге разрушения световода потери увеличивались до 1,75 дБ/м.

Полученные данные показывают, что зависимость потерь от растяжения имеет нелинейный характер, их необходимо учитывать при работе со световодами, в частности при расчете предельной чувствительности детектора элементарных частиц на основе сцинтилляционных световодов.

Список литературы

1 Mapelli A. Alessandro Scintillation Particle Detectors Based on Plastic Optical Fibres and Microfluidic: Thesis... PhD : #5033. Lausanne.: École Polytechnique, 2011.

2 A scintillating fibre hodoscope for high rate applications / J. Bisplinghoff // Universitat Bonn, 2002.

3 BCAL Scintillating Fibre Performance: Half Way Milestone, University of Regina, 2010.

4 The Effect of Environment on the Strength of Optical Fiber / Duncan W. J. [et al.] // Proc. of Advanced Research Workshop on Strength Inorganic Glass, NATO, Algarve, US, 1983. 19 p.

МОБИЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСИИ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

**А. В. Борисова, О.А. Гарин, Т. А. Ишбердина, А. О. Чернуцкий, Я. А.
Денисова, К. В. Степанов, А. Б. Пнёв**

МГТУ им. Н. Э. Баумана, НОЦ «Фотоника и ИК-техника», Москва

Особый интерес в настоящее время представляют фотонно-кристаллические волокна (ФКВ). В частности, они применяются для генерации суперконтинуума [1]. Путем изменения параметров световода можно добиться необходимого значения дисперсии, которая влияет на нелинейные свойства волокна. Для обеспечения наиболее эффективной генерации суперконтинуума необходимо, чтобы длина волны лазера накачки соответствовала длине волны нулевой дисперсии ФКВ, которая может изменяться в широком диапазоне (0,7-1,6 мкм). Поэтому спектральная зависимость хроматической дисперсии (ХД) является одной из основных характеристик ФКВ [1], а её измерение – актуальной научно-технической задачей.

Целью данной работы является разработка методики измерения хроматической дисперсии в фотонно-кристаллических волокнах на основе интерференционного метода. Из-за технологической сложности не изготавливают ФКВ большой протяжённости, а данный метод допускает измерение дисперсии на малых отрезках волокна. Кроме того, для ФКВ существует специфический диапазон частот, актуальный из-за его применения для генерации суперконтинуума: 780-800 нм, 1030-1070 нм, 1520-1610 нм, соответствующие спектрам излучения наиболее распространенных лазеров: Ti:Sa, Yb³⁺, Er³⁺ [2, 3].

Для решения проблем, связанных с потерями в схемах с широкополосным источником и монохроматором и в схемах с пространственным интерферометром, вместо открытого интерферометра используется волоконный, а источником излучения служит блок лазеров с

несколькими каналами: 780-880 нм, 960-1130 нм, 1490-1620 нм.

Предлагаемый метод основан на измерении зависимости относительной групповой задержки от длины волны в исследуемом волокне. Для реализации данного метода была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1. Источником излучения является блок лазеров 1 с тремя каналами. Для одного измерения используется свой канал с соответствующим набором лазеров. Ответвитель 2 направляет часть излучения к измеряемому волокну 7, которое подсоединяется с помощью разъёмов оперативного подключения 6. Другая часть излучения идёт во второе плечо интерферометра, состоящую из регулируемой линии оптической задержки, которая образована коллиматором 4 и перемещающимся уголковым отражателем 5, и аттенюатора 8, необходимого для выравнивания контраста. Затем излучение с обоих плеч интерферометра объединяется с помощью ответвителя 9 и подается на приемник излучения (ПИ), с которого оцифровывается на АЦП, после чего может быть представлен на экране ПК.

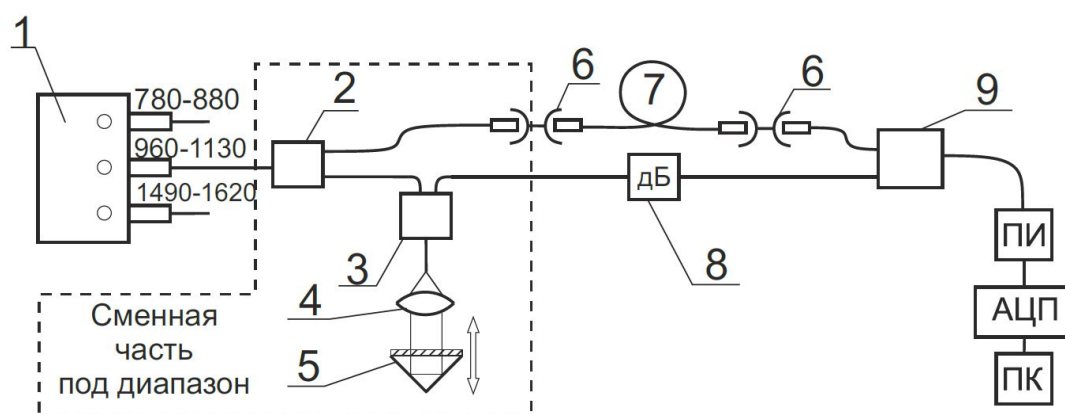


Рисунок 1 – Схема установки

За счет применения мощных источников излучения (лазеров), большие потери на разъемах не мешают измерению ХД. Также к достоинствам разработанной методики измерения можно отнести простоту сборки и юстировки, незначительное влияние внешних условий на работу установки, а также компактность прибора, измеряющего ХД по этому методу.

Вычисление дисперсии происходит на основании обработки сдвига максимума интерференционной картины, получаемой при перемещении линии задержки. Его положение соответствует нулевой разнице Δz оптической длины плеч интерферометра и зависит от скорости распространения излучения с конкретной длиной волны λ согласно выражению

$$I(x, \lambda) = I_1(x) + I_2(x) + 2\sqrt{I_1(x)I_2(x)} \cos\left(\frac{2\pi\Delta z}{\lambda}\right) \gamma(D, \lambda)$$

где I_i – интенсивность излучения в i плече интерферометра, γ – форма функции, описывающей когерентность источника, D – дисперсия, определяемая как

$$D = \frac{\Delta x}{c \cdot l \cdot \Delta \lambda}$$

где l – длина ФКВ, Δx – расстояние между максимумами интерференционных картин от лазеров, отстоящих друг от друга на величину $\Delta \lambda$.

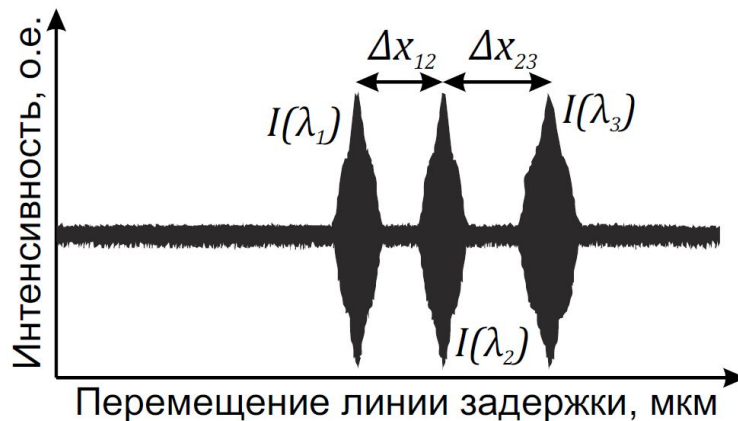


Рисунок 2 – Изображение смещения максимумов интерферограммы на разных длинах волн

Список литературы

1. Левченко А. Е., Курков А. С., Семенов С. Л. Измерение дисперсии в волоконных световодах с микроструктурированной оболочкой // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. - №9. – С. 835-838
2. Кобцев С. М., Кукарин С. В., Фатеев Н. В. Генерация поляризованного суперконтинуума в квазиэллиптических световодах малого диаметра //Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – №. 12. – С. 1085-1088.
3. Lazarev V. A. et al. Hybrid mode-locked ultrashort-pulse erbium-doped fiber laser //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – Т. 486. – №. 1. – С. 012004.

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХКАНАЛЬНЫХ СПЛАВНЫХ WDM-ДЕМУЛЬТИПЛЕКСОРОВ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

С.Г.Елизаров, Н.Т.Ключник, В.А.Кузнецов, В.С.Чижов, М.Я.Яковлев

ЗАО «ЦНИТИ «Техномаш-ВОС», Москва

В последние годы широкое распространение получили волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением каналов (WDM). Для их построения используются специальные оптические устройства – мультиплексоры/демультиплексоры. Обычно в качестве мультиплексоров и демультиплексоров используются одни и те же обратимые оптические устройства спектрального уплотнения, которые далее будем называть демультиплексорами. Среди различных типов двухканальных устройств WDM широкое применение находят двухканальные демультиплексоры с уплотнением по длинам волн 1310 и 1550 нм, выполненные на основе одномодовых сплавных разветвителей типа 1x2.

Основной характеристикой WDM-демультиплексора является коэффициент изоляции каналов, который определяет уровень ослабления сигнала в каналах, где этот сигнал не является основным. Механические и температурные воздействия, которым может подвергаться демультиплексор в процессе эксплуатации, могут приводить к деформации его волоконно-оптической структуры и, как следствие, к уменьшению коэффициента изоляции и нарушению работы линии передачи. В связи с этим, актуальными являются вопросы исследования влияния деформации структуры сплавных демультиплексоров на их оптические характеристики, включая измерения коэффициента изоляции в условиях внешних воздействий.

Получение сплавных волоконных структур демультиплексоров производилось на установке для изготовления разветвителей FCI-0201 фирмы NTT AT (Япония) (рис. 1).

Очищенные от защитного покрытия участки одномодовых оптических волокон 1 соединяются между собой боковыми поверхностями, закрепляются

в зажимах 2 на подвижных каретках 3, которые могут перемещаться вдоль направляющих 4 устройства растяжки, и помещаются в зону нагрева нагревателя 5. После нагрева до температуры, обеспечивающей сплавление волокон, производится растяжка зоны сплавления с целью получения плавного биконического перехода 6.

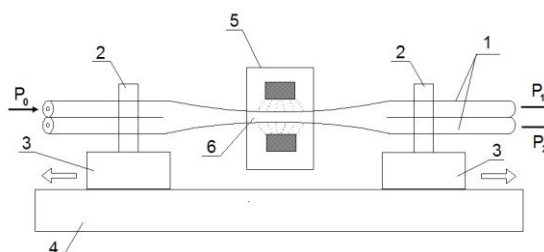


Рис. 1. Метод изготовления сплавных волоконных демультиплексоров.

1— оптические волокна; 2—зажимы; 3—подвижные каретки; 4—устройство растяжки; 5—нагреватель; 6—зона сплавления.

В процессе растяжения зоны сплавления осуществлялся ввод оптического излучения (P_0) и измерялись текущие значения мощности излучения P_1 и P_2 в выходных портах. Процесс останавливался при достижении минимального значения мощности в одном из выходных каналов. Максимальное значение оптической изоляции, измеряемое по окончании процесса формирования сплавной структуры, составляло 23–25 дБ. Вносимые потери не превышали 0,15 дБ.

Проводилось исследование влияния механических напряжений, возникающих при скручивании и изгибе волоконной структуры сформированных демультиплексоров на величину оптической изоляции. Схемы экспериментов по измерению оптических характеристик демультиплексоров в условиях указанных воздействий приведены на рис. 2 и рис. 3.

В первом эксперименте (рис. 2) один участок (1) волоконных выводов (2) демультиплексора был зафиксирован, а другой (3) вращался вокруг оптической оси биконической структуры. Расстояние между участками фиксации и вращения волокон l составляло 70 мм.

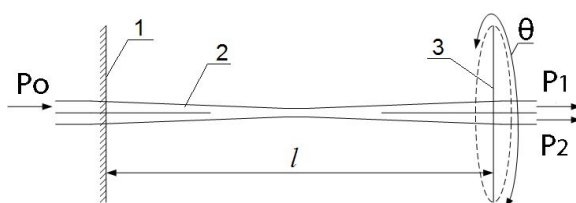


Рис. 2. Измерение оптических характеристик демультиплексора при скручивании волоконной структуры.

Во втором эксперименте (рис. 3) волоконные выводы (1) были зафиксированы в зажимах (2) на подвижных каретках (3) устройства растяжки (4). Осуществлялось встречное перемещение кареток, при этом формировался изгиб волоконной структуры (5).

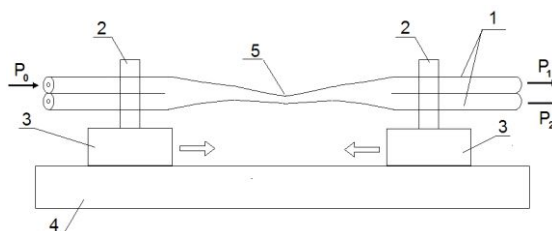


Рис. 3. Измерение оптических характеристик демультиплексора при изгибе волоконной структуры.

Получены экспериментальные зависимости, показывающие, что механические напряжения, возникающие в результате изгиба и скручивания волоконной структуры демультиплексора, приводят к перераспределению оптической мощности в каналах и, как следствие, к изменению коэффициента изоляции. Показано, что при снижении до минимума влияния указанных факторов возможно получение сплавных демультиплексоров с оптической изоляцией до 30–32 дБ.

Рассмотрены возможные механизмы влияния на оптическую изоляцию каналов скручивания волоконных выводов демультиплексора. Этот эффект необходимо учитывать при проведении измерений оптических характеристик сплавных демультиплексоров и при дальнейшей их эксплуатации.

**РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ
ТЕМПЕРАТУРЫ И ДЕФОРМАЦИИ И ВОПРОСЫ ИХ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

В.В. Григорьев, В.Е. Кравцов, А.К. Митюрёв, С.В. Тихомиров,

Н.П. Хатырев

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Информационно-измерительные системы (ИИС) на основе волоконно-оптических датчиков (ВОД) физических величин получили широкое применение в мире уже давно. ВОД – это чувствительные элементы на основе оптического волокна, которые преобразуют приложенное к ним физическое воздействие – изменение температуры, давления, электрического тока или напряжения, механической деформации и т. д. – в изменение различных параметров проходящего через них оптического излучения. К основным достоинствам ВОД относятся отсутствие электропитания, высокая устойчивость к воздействиям внешних факторов (агрессивные среды, сильные электромагнитные поля), возможность получения пространственного распределения измеряемой величины, пожаро- и взрывобезопасность.

В последние несколько лет интерес к подобным системам возрос и в России. Локомотивом внедрения ИИС на основе ВОД на территории страны являются компании, работающие в нефтегазовой отрасли (измерения деформаций в газопроводе, распределения температуры в нефтяной скважине и т.д.). Для обеспечения единства измерений в данной области во ВНИИОФИ проводятся работы по испытаниям и калибровке ИИС на основе ВОД.

Обычно ИИС на основе ВОД включает в себя две части: собственно устройство для измерений определённого оптического параметра (параметров) и первичный преобразователь измеряемой величины (чувствительный элемент) в этот оптический параметр.

Принцип действия ИИС на основе ВОД зависит от физического

явления, лежащего в его основе. По этому признаку можно выделить три наиболее востребованных в настоящее время вида ИИС на основе ВОД:

- 1) ИИС на основе брэгговских датчиков;
- 2) ИИС на основе бриллюэновского рефлектометра;
- 3) ИИС на основе рамановского рефлектометра.

В первом случае принцип действия заключается в построении спектра отражённого от брэгговских датчиков оптического излучения с последующим поиском экстремумов и определением соответствующих данным экстремумам значений длины волны. Брэгговский датчик представляет собой участок оптического волокна с градиентом показателя преломления периодического характера (брэгговская решётка), в результате чего часть проходящего через данное волокно излучения в достаточно узком спектральном диапазоне (0,1-0,2 нм) отражается, причём длина волны максимума коэффициента отражения соответствует периоду решётки. При изменении данного периода вследствие каких-либо физических процессов (деформация, изменение температуры) длина волны отражения брэгговской решётки также изменит своё значение. Изменение длины волны максимума коэффициента отражения решётки можно преобразовать в изменение температуры с коэффициентом в диапазоне от 2 до 14 пм/°С (в диапазоне температур от минус 200°С до плюс 300°С) или механическую деформацию с коэффициентом около 12 нм/% относительного удлинения решётки [1]. Данные системы являются квазираспределёнными. Первичным преобразователем является набор брэгговских датчиков, соединённых между собой и измерительным устройством с помощью волоконно-оптических кабелей.

Во втором случае принцип действия состоит в измерении бриллюэновского сдвига частоты обратно рассеянного импульсного лазерного излучения, распространяющегося в оптическом волокне по всей его длине. Результатом измерений является массив рефлектограмм (график зависимости мощности рассеянного излучения от длины волокна), каждая из

которых соответствует определённой частоте бриллюэновского сдвига. При деформации или изменении температуры оптического волокна бриллюэновская частота, на которой наблюдается максимум рассеянного сигнала, сдвигается. Измеренное распределение частотного сдвига преобразуется в температурные изменения с коэффициентом около 1.2 МГц/°С или механические деформации с коэффициентом около 500 МГц/% относительного удлинения волокна [2]. Данные системы являются распределёнными. Первичным преобразователем выступает одномодовое оптическое волокно в специальной оболочке.

В третьем случае используется эффект комбинационного рассеяния света (Рамановское рассеяние) на молекулах среды, при котором спектр рассеянного излучения содержит дополнительные компоненты с длиной волны большей, чем длина волны излучения накачки (стоксовский компонент), и меньшей – антистоксовский компонент. Интенсивность последнего чувствительна к локальным изменениям температуры, поэтому данные системы используют для измерений распределения температуры вдоль оптического волокна (волоконного кабеля). Первичным преобразователем являются многомодовые и одномодовые оптические волокна в специальной оболочке.

Для решения задач поверки и калибровки рассмотренных выше ИИС на основе ВОД, а также проведения испытаний в целях утверждения типа, необходимо учитывать особенности эксплуатации таких систем. А именно отсутствие возможности перемещений ранее установленных первичных преобразователей (датчиков) для проведения их калибровки или периодической поверки в составе ИИС. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев первичный преобразователь связан с объектом измерений с помощью неразрывного соединения (например, приклеен к газопроводной трубе), а также сами условия эксплуатации объекта могут запрещать к нему доступ в течение долгого времени (например, нескольких десятилетий). Таким образом, калибровка ИИС на основе ВОД как всей

системы (измерительное устройство вместе с первичным преобразователем) бывает часто возможна только на этапе проведения испытаний с целью утверждения типа средства измерений и первичной поверки. Возможность прохождения периодической поверки в этом случае есть только у измерительного устройства. Стоит отметить, что первичные преобразователи на основе оптического волокна сохраняют свои метрологические характеристики на протяжении достаточно длительного периода времени [3], и поэтому межповерочный интервал для них может быть увеличен до десяти и более лет. Основанием для такого шага могут служить результаты исследований долговременной стабильности преобразовательных свойств чувствительных элементов (например, коэффициент преобразования изменения температуры в изменение длины волны отражения брэгговского датчика) в соответствующих условиях самим производителем у себя на заводе с нормированием данного параметра при выпуске продукции.

Исходя из вышеизложенного, при проведении испытаний с целью утверждения типа средства измерений, поверки и калибровки ИИС на основе ВОД необходимо определить метрологические характеристики измерительного устройства без первичного преобразователя с использованием соответствующих эталонных методов и средств измерений, а также метрологические характеристики измерительного устройства вместе с преобразователем, чтобы оценить соответствие коэффициентов преобразования первичного преобразователя значениям, указанным в эксплуатационной документации. Здесь стоит обратить внимание на то, что производитель должен указывать в документации отдельно характеристики для первичного преобразователя и измерительного устройства. В дальнейшем на периодическую поверку может отправляться только измерительное устройство, тогда как первичный преобразователь остаётся на месте эксплуатации весь свой нормированный срок службы, по истечению которого заменяется на новый.

Возвращаясь к рассмотренным видам систем измерений деформации и

температуры, например, к ИИС на основе брэгговских датчиков, процесс метрологического обслуживания такой системы может выглядеть следующим образом. В данном случае оптическим параметром является длина волны лазерного излучения, отражённого брэгговским датчиком (первичным преобразователем). При этом измерительное устройство является анализатором оптического спектра (измерителем длины волны) лазерного излучения в оптическом волокне, поверка и калибровка которого осуществляется в соответствии с ГОСТ 8.585-2005 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации» с помощью рабочего эталона единицы длины для ВОСП (в ряде случаев необходимо применять Государственный первичный эталон ГЭТ 170-2011).

Для проведения испытаний и первичной поверки такой системы понадобятся указанный эталон, а также термоклиматическая камера и стенд для создания механического растяжения/сжатия с соответствующими метрологическими характеристиками. Если в состав испытываемой ИИС входят брэгговские датчики с нормированными и стабильными коэффициентами преобразования деформации и температуры в длину волны, то периодическая поверка такой системы выливается в поверку спектроанализатора для ВОСП.

Кроме того, необходимо обратить внимание на тот факт, что для распределённых ИИС на основе бриллюэновского и рамановского рефлектометров, важным параметром измерений является расстояние до места события (например, локальное изменение температуры), то есть пространственное распределение температуры и деформации контролируемого объекта. Этот параметр также необходимо нормировать как при проведении испытаний и первичной поверки, так и периодической. Нормировка длины в световоде также осуществляется в соответствии с ГОСТ 8.585-2005 с помощью рабочего эталона единиц длины и ослабления в световоде или эталона ГЭТ 170- 2011.

Подводя итоги вышесказанного, можно сделать следующие выводы.

В процессе метрологического обслуживания систем на основе брэгговских датчиков, а также бриллюэновского и рамановского рефлектометров, целесообразно разделять ИИС на две части – измерительное устройство и первичный преобразователь. В случае стабильности оптических свойств первичного преобразователя, подтверждённой изготовителем, периодическая поверка системы может сводиться к поверке измерительного устройства по оптическим метрологическим характеристикам, включая длину, как важного параметра распределенных систем и длину волны.

Создание метрологической базы для проведения поверки, калибровки и испытаний ИИС на основе ВОД во ФГУП «ВНИИОФИ» практически завершено; это позволяет проводить в настоящее время испытания подобных систем.

Список литературы

1. Micron Optics Inc. Support_downloads/WitePapers [Электронный ресурс]: Micron Optics Inc. Grating Based Temperature Sensors – Temperature Calibration and Thermal Response – Режим доступа: <http://www.micronoptics.com/uploads/documents/TemperatureCalibration-FBGSensors-r2.pdf>, свободный.
2. Luc THÉVENAZ Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives // Higher Education Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 2010.
3. Н.П. Хатырев, А.Б. Пнев, С.В. Тихомиров «Особенности метрологического обеспечения информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптических датчиков» // Тезисы доклада 18-ой Всероссийской конференции «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение», г.Москва, 2013 г.

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ
ГРАДУИРОВОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЁМНИКОВ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОСП**

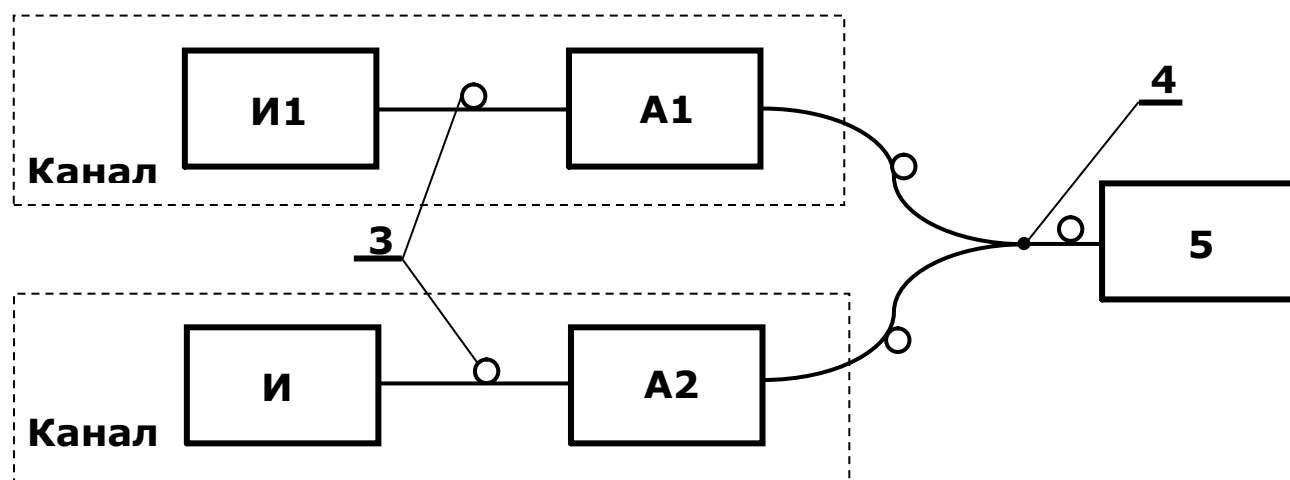
С.Б.Бычков, А.И.Глазов, А.Б.Светличный

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

Задача исследования нелинейности градуировочных характеристик эталонных и высокоточных средств измерений средней мощности оптического излучения для ВОСП является крайне важной при их поверке и калибровке. Это связано с нелинейными эффектами как в фотоприёмнике, так и в усилительном тракте указанных средства измерения, имеющих динамический диапазон 80 – 100 дБ

В установке реализован метод сложения света. Сущность этого метода состоит в измерении исследуемым прибором мощности оптического сигнала последовательно только из канала 1 (P_1), только из канала 2 (P_2), суммарной из канала 1 и 2 (P_{1-2}) и сравнении $(P_1 + P_2)$ с (P_{1-2}) .

Блок-схема, поясняющая принцип работы установки, представлена на рисунке 1.



И1, И2 – излучатели; А1, А2 – аттенюаторы; 3 - оптические кабели;

4 - сумматор волоконно-оптический; 5 - исследуемый прибор.

Рисунок 1 - Блок-схема установки для измерений нелинейности приемников

Установка состоит из двух идентичных независимых каналов 1 и 2. Каждый канал состоит из излучателя И1 (И2) и аттенюатора с затвором А1 (А2), соединенных оптическим кабелем 3. Затвор может перекрывать оптическое излучение, не меняя вносимого затухания аттенюатора. Излучение двух независимых каналов складывается волоконно-оптическим сумматором 4 и подаётся на вход исследуемого прибора 5.

В состав установки входят два блока стабилизированных источников лазерного излучения, два аттенюатора FVA-3150-C-EI-EUI-89 (многомодовых) и два аттенюатора FVA-3150-B-EI-EUI-89 (одномодовых). Для измерений на длинах волн 1310, 1550 и 1625 нм используются одномодовые выходы источников с длинами волн 1310, 1550 и 1625 нм и два аттенюатора FVA-3150- B -EI-EUI-89 с одномодовыми оптическими кабелями и сумматор волоконно-оптический одномодовый. Для измерений на длине волны 850 нм используются многомодовые выходы источников с длиной волны 850 нм и два аттенюатора FVA-3150-C-EI-EUI-89 с многомодовыми оптическими кабелями и сумматор волоконно-оптический многомодовый. Управление источниками и аттенюаторами осуществляется от компьютера по интерфейсам GPIB и RS-232. Программное обеспечение позволяет производить измерение нелинейности в полуавтоматическом режиме. В каждой точке для каждого измерения запоминаются настройки аттенюаторов, показания исследуемого прибора, что позволяет в случае промаха без труда произвести измерение нелинейности в точке ещё раз. Кроме того, автоматически вычисляются значения нелинейностей в точках, суммарная нелинейность, составляется протокол измерений. Измеряемые значения мощностей могут вводиться как в децибелах, так и в ваттах, полученные значения нелинейностей могут отображаться как в процентах, так и в децибелах.

Программное обеспечение позволяет реализовать методики измерений нелинейности как по Р 50.2.084-2013 - «Рабочие эталоны единицы средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах

передачи. Методика поверки», так и по ИЕС 61315-2005.

Установка позволяет проводить измерение нелинейности градуировочной характеристики приёмников оптического излучения в диапазоне 65 дБ без изменения мощности источников оптического излучения и до 90 дБ с изменением мощности источников. Погрешность измерений не более 01 % на декаду.

Установка для измерений нелинейности градуировочной характеристики приёмников оптического излучения для ВОСП была изготовлена и поставлена Институту физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси и вошла в состав Национального эталона единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации республики Беларусь. В настоящее время аналогичная установка вводится в состав Государственного первичного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем передачи информации ГЭТ 170-2011.

**ТЕНДЕНЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХКОРОТКИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ АНАЛОГОВОЙ
ФОТОНИКИ**

**К.Ю. Сахаров, А.В. Сухов, В.А. Туркин, О.В. Михеев
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва**

Электромагнитные импульсы короткого и сверхкороткого диапазонов длительности в десятки и сотни пикосекунд используются в сверхширокополосной радиолокации, радиосвязи, для измерения характеристик радиопоглощающих материалов, а также при разработке эффективных методов и средств защиты от воздействия импульсных электромагнитных излучений.

Практика применения сверхкоротких электромагнитных импульсов при повышении мощности выявила проблему их влияния на работу электронной аппаратуры. Оказалось, что при уровнях напряженности поля всего порядка 100 В/м, происходят сбои функционирования радиоприемных устройств, а для цифровой аппаратуры критический уровень составляет несколько киловольт на метр. При уровнях 30 кВ/м происходят необратимые отказы недостаточно защищенной электронной техники. Данный уровень напряженности поля для наиболее жестких испытаний был закреплен в стандарте ГОСТ Р 52863-2007 «Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям. Общие требования». Под преднамеренными воздействиями в ГОСТ Р 52863-2007 понимаются воздействия с террористическими целями. Поэтому качество проведения испытаний напрямую связано с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники РФ по обеспечению безопасности и противодействию терроризму.

В настоящее время метрологическое обеспечение в области измерений параметров электромагнитных импульсов осуществляется с помощью пассивных измерительных преобразователей полоскового типа, которые калибруются и поверяются в эталонных полеобразующих системах типа моноконуса и ТЕМ-камер [1]. В стране имеются два государственных первичных эталона ГЭТ 148 и ГЭТ 178, возглавляющие государственные поверочные схемы (ГПС) по ГОСТ 8.540-2011 и ГОСТ 8.609-2012. Первичные и вторичные (рабочие) эталоны, построенные по указанному принципу, работают в двух амплитудно-временных диапазонах: диапазон длительностей от 20 пс до 1 нс амплитудой до 100 В/м для ГПС по ГОСТ 8.609-2012 и диапазон длительностей от 100 пс до 100 мкс амплитудой до 300 кВ/м для ГПС по ГОСТ 8.540-2011.

Существующее метрологическое обеспечение рассматриваемой области измерений основано на создании расчетных электромагнитных импульсов в конических и ТЕМ-камерных полеобразующих системах, возбуждаемых генераторами ступенчатых импульсов напряжения с длительностью фронта в десятки пикосекунд, но амплитудой до 10 В или в десятки киловольт, но с фронтом в сотни пикосекунд. Технически реализовать режим возбуждения полеобразующих систем коротким фронтом и большой амплитудой в настоящее время не представляется возможным вследствие отсутствия в России и за рубежом соответствующих мощных коммутаторов.

Решение проблемы может быть осуществлено, если на больших уровнях поля поменять принцип метрологического обеспечения. Вместо расчетного источника поля использовать расчетный эталонный приемник (измерительный преобразователь) импульсного поля, основанный на методах аналоговой фотоники. В качестве эталонного приемника предлагается использовать электрооптические кристаллы, в которых происходит модуляция оптического излучения измеряемым сигналом поля. Электрооптические преобразователи имеют полосу в десятки гигагерц,

полностью диэлектрическое исполнение, обеспечивающее минимальные искажения измеряемого поля, а также относительно высокую чувствительность (измерение полей амплитудой от 1 кВ/м). Обладая идеальной широкополосностью электрооптические преобразователи могут быть откалиброваны по постоянному (квазистатическому) электрическому полю, точность воспроизведения которого очень высока. Не составляет труда получить неопределенность воспроизведения постоянного поля в 1%. Основная погрешность электрооптического преобразования, нам представляется, будет обусловлена нелинейностью преобразования и переходными процессами поля в оптическом и электрическом трактах преобразователя. Кроме того, необходимо решить проблемы температурной нестабильности электрооптических кристаллов.

Во ВНИИОФИ совместно с ИОФ РАН были проведены исследования электрооптического преобразователя напряженности электрического поля на основе аналоговой фотоники, использующего кристалл DAST. Выполнено сравнение электромагнитных импульсов длительностью около 200 пс, зарегистрированных электрооптическим преобразователем и измерительным преобразователем на основе полосковой линии ИППЛ-Л [2]. Установлено, что форма импульсов на выходе электрооптического преобразователя повторяет форму импульсов на выходе ИППЛ-Л. Это свидетельствует о том, что время нарастания переходной характеристики электрооптического преобразователя составляет, по крайней мере, не более времени нарастания переходной характеристики ИППЛ-Л. Минимальное время нарастания определяется, по-видимому, широкополосностью фотоприемника.

Проведенные экспериментальные исследования показали перспективность решения вопроса метрологического обеспечения измерений параметров мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов на основе аналоговой фотоники.

Исследования проведены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.624.21.0003 от 11 августа

2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI62414X0003).

Список литературы

1. Sokolov A.A., Sakharov K. Yu. Test and Standard Sources of Electromagnetic Pulses // Proc. of UWBUSIS-2006 (Sevastopol, Ukraine). – P. 60-65.

2. Сверхширокополосный электрооптический преобразователь напряженности импульсного электрического поля / Т.В. Долматов, В.В. Букин, К.Ю. Сахаров [и др.] // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 42-44.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Я.В. Гладышева, Н.В. Барышников, И.В. Животовский,

Д.Г. Денисов, А.Б. Пнев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

В настоящее время большой интерес вызывают задачи, связанные с определением и контролем параметров качества оптических поверхностей в широком пространственно-частотном диапазоне. Это связано с появлением ряда современных технических систем, в состав которых входят крупногабаритные высокоточные оптические детали, в том числе с плоскими рабочими поверхностями [1]. Требования к качеству поверхностей таких деталей очень высоки, так как определяют качество функционирования оптической системы в целом.

Для контроля параметров качества поверхностей используются интерферометрические методы восстановления профиля оптической поверхности в комплексе с методами калибровки. Однако, если качество измеряемой детали сравнимо с качеством эталонной поверхности, то для получения объективных результатов требуется исключить ошибки поверхности эталона из результатов измерений. Для этой задачи используется метод абсолютной калибровки.

В качестве метода абсолютной калибровки часто используется метод трех плоскостей, реализованный в схеме интерферометра Физо и заключающийся в попарном сравнении трех плоскопараллельных пластин [2-3]. Метод позволяет определить только линейный профиль измеряемой поверхности. Для восстановления двумерного профиля поверхности существует ряд методов, использующих в алгоритме разложение по полиномам Цернике, четные и нечетные функции, повороты одной из пластин, а также методы, основанные на свойствах симметрии [3-4]. Однако ни один из этих методов не позволяет проводить измерения

крупногабаритных оптических поверхностей в широком пространственно-частотном диапазоне ($4 \times 10^{-1} - 1.67 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$) с необходимой точностью.

Авторами был реализован алгоритм абсолютной калибровки методом двух плоскостей [5]. Метод заключается в измерении исследуемой относительно эталонной при последовательном перемещении исследуемой поверхности относительно эталонной в плоскости перпендикулярной оптической оси. Этот метод позволяет получить информацию о форме эталонной и исследуемой поверхностей по-отдельности.

В работе был проведен анализ погрешности восстановления профиля оптической поверхности по методу двух плоскостей при помощи математического моделирования. В результате моделирования был определен диапазон допустимых перемещений поверхности для восстановления поверхности с необходимой точностью.

Результаты восстановления реальной поверхности, полученной при помощи динамического интерферометра Intellium H2000 (ESDI, USA), показали, что восстановление поверхности возможно в диапазоне $1,67 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2} \text{ мм}^{-1}$.

Список литературы

- [1] Campbell J. H. NIF optical materials and fabrication technologies: An overview // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5341.
- [2] B. S. Fritz, “Absolute calibration of an optical flat,” Opt. Eng. 23, 379–383 (1984).
- [3] Chen Xu, Lei Chen,* and Jiayi Yin Method for absolute flatness measurement of optical surfaces. APPLIED OPTICS / Vol. 48, No. 13 / 1 May 2009
- [4] U. Griesmann, “Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry,” Appl. Opt. 45, 5856–5865 (2006).
- [5] Franck Morin, Stéphane Bouillet Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat. Proc. of SPIE Vol. 6616 66164G-1

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ФАЗОВЫХ ПРОЕКЦИЙ В ОПТИЧЕСКОМ ТОМОГРАФЕ

М.И. Латушко

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

В оптической томографии живых клеток одной из проблем при получении большого количества фазовых проекций является точность измерения оптической разности хода.

Целью данной работы являлась оценка погрешности реконструкции фазовых проекций.

На рис.1а представлена схема оптического томографа. Рассматривается работа одного из основных узлов – сдвигового интерферометра общего пути, построенного по схеме Майкельсона (рис.1б).

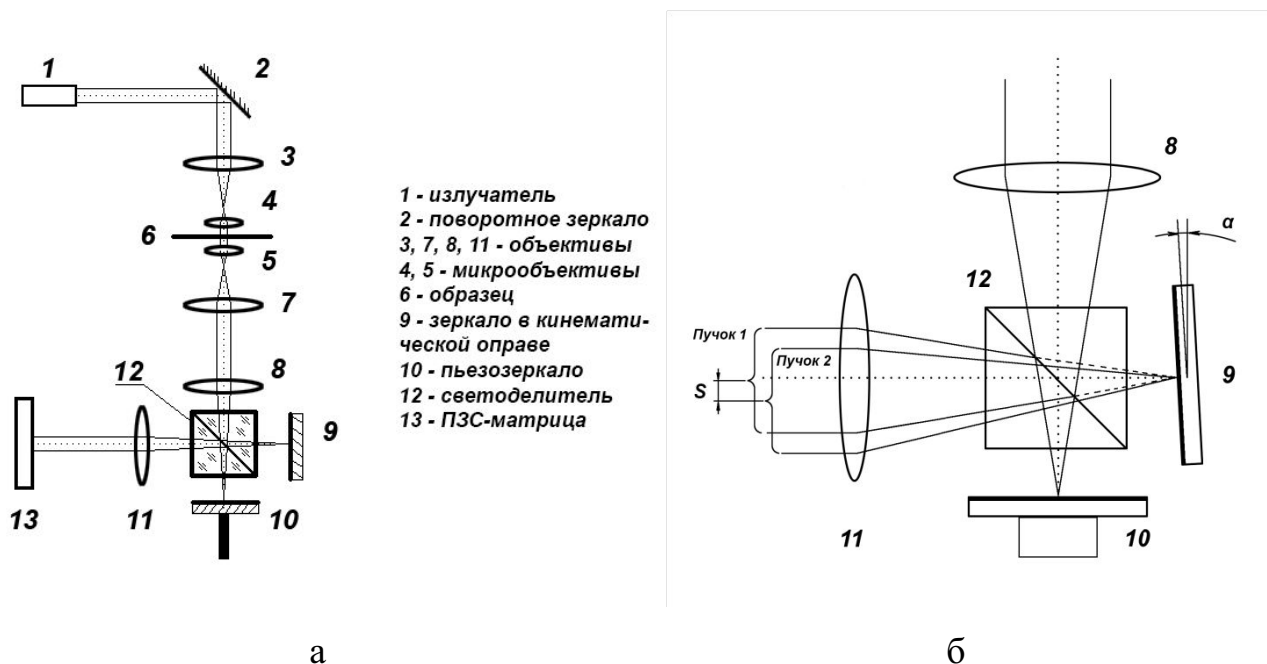


Рисунок 1 – схема оптического томографа (а) и сдвигового интерферометра Майкельсона (б)

В качестве излучателя в схеме используется точечный светодиод (Kyosemi, $\lambda=650\text{нм}$, размер светящейся площадки $\sim 80\text{мкм}$). Параллельный пучок некогерентного излучения, проходит через образец б – два

покровных стекла, скрепленных физ.раствором. Излучение попадает в 4f-систему, образованную объективами 8 и 11. Внутри 4f-системы в общей фокальной плоскости расположен интерферометр Майкельсона, конструктивно выполненный в виде светоделителя 12, зеркала на пьезодвигателе 10, и зеркала в кинематической оправе 9, повернутого на малый угол α относительно оптической оси, что обеспечивает малый поперечный сдвиг S на выходе между пучками.

Интерферометр работает на бесконечно широкой полосе и для реконструкции двумерного распределения градиента оптической разности хода вдоль направления сдвига интерферирующих пучков в фоновом изображении $OPD(x, y)$ применяется метод фазовых шагов.

В первую очередь возникает вопрос о точности, с которой восстанавливается значение оптической разности хода в произвольной точке поля зрения. В качестве оценки данного параметра применяется понятие уровня пространственно-временных шумов [1, 2].

В идеальном случае оптическая разность хода двух плоских интерферирующих волн в любой точке области их наложения будет постоянна. Однако добиться подобного практически невозможно, поскольку возникают различные искажения волновых фронтов из-за загрязнения оптики, отклонений положения пьезозеркала от заданных значений и случайных температурных флуктуаций воздуха в плечах интерферометра.

Для оценки уровня пространственных шумов в пределах одного фазового изображения размером $N \times M$, рассчитывается среднеквадратическое отклонение оптической разности хода от среднего значения

$$\Omega_s = \sqrt{\frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [OPD(x, y) - \overline{OPD}]^2}$$

где $\overline{OPD} = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M OPD(x, y)$ – среднее значение оптической разности хода в пределах одного изображения.

Уровень временных шумов рассчитывается по всем полученным фазовым изображениям $k = 1, 2 \dots K$. Для каждой точки (x, y) фазового изображения рассчитывается среднеквадратическое отклонение оптической разности хода от среднего значения для данной точки

$$\Omega_T |_{x,y} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [OPD^k(x, y) - \overline{OPD}_{x,y}]^2}$$

где $\overline{OPD}_{x,y} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K OPD^k(x, y)$ – среднее значение оптической разности хода в данной точке.

Для точечной оценки уровня временных шумов всех точек, вычисляется величина

$$\Omega_T = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \Omega_T |_{x,y}$$

Для экспериментальной оценки уровня пространственных и временных шумов было получено 150 изображений фона. Результаты обработки данных в MATLAB показали, что уровень пространственных шумов составил 1.25 нм , а временны шумов – 0.26 нм .

Список литературы

1. T. Nguyen, G. Popescu, “Spatial Light Interference Microscopy (SLIM) using twisted-nematic liquid-crystal modulation”, Biomedical Optics Express, Vol.4, No.9, PP.1571-1583, 2013
2. P. Girshovitz, N. Shaked, “Compact and portable low-coherence interferometer with off-axis geometry for quantitative phase microscopy and nanoscopy”, Optics Express, Vol.21, No.5, PP.5701-5714, 2013

**ПРЕДОБРАБОТКА ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ НА СКАНИРУЮЩЕМ СДВИГОВОМ
ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ**

Н.А. Некрасов, Г.Н. Вишняков

ФГУП “ВНИИОФИ”, Москва

Для определения пространственного распределения показателя преломления фазового объекта через решение обратной задачи Радона в первую очередь требуется получить фазовые проекции для некоторого диапазона углов освещения. При этом фазовая проекция является двумерной картой оптической разности хода (ОРХ) лучей, прошедших через объект и окружающую среду. Наиболее распространены томографические алгоритмы, работающие с оптической разностью хода (ОРХ), однако конструкция сдвигового интерферометра приводит к получению данных о производной от ОРХ по направлению сдвига. Другая особенность оптической томографии заключается в том, что регистрируются планарные проекции, строящиеся на одной и той же неподвижной плоскости, тогда как для томографической реконструкции необходимы проекции на плоскости, строго перпендикулярной направлению освещения. Более того, проекции регистрируются для углов освещения с непостоянным шагом по углу.

Предобработка проекционных данных перед интегрированием и томографической реконструкцией включает в себя два этапа: приведение проекций к требуемому формату и их согласование по интегральным характеристикам. Для этого предлагается комплексный алгоритм обработки.

В первый этап входят три операции. На наборе проекций выполняется выделение объекта для обработки. Это позволяет исключить из обработки данные, не несущие целевой информации, что сокращает время вычислений. Затем производится интерполяция данных по углу освещения, что позволяет перейти к регулярной сетке по углам освещения, что требуется для томографического алгоритма. Далее новый интерполированный набор

подвергается сжатию вдоль одной из осей в соответствии с углом освещения для каждой проекции. В результате этого этапа набор проекций не согласован по координатам, однако соответствует проекциям объекта на плоскость перпендикулярную направлению освещения объекта.

Второй этап включает в себя операции по нормированию проекций для согласования интегральных характеристик:

- объекты в обрабатываемой области имеют конечный размер

$$m_{dx}^{00} = \sum_{x,y=0}^{w,h} pixel_{x,y} = 0$$

- для всех углов освещения 1-ый момент в направлении сдвига равен фиксированной константе

$$m_{dx}^{10} = \sum_{x,y=0}^{w,h} x \cdot pixel_{x,y} = const$$

- система координат каждой проекции привязывается к центру масс изображения объекта (формулы получены в рамках работы для изображений производной ОРХ)

$$x_{m.c.} = \frac{m_{dx}^{20}}{2 \cdot m_{dx}^{10}} = \frac{\sum_{x,y=0}^{w,h} x^2 \cdot pixel_{x,y}}{2 \cdot \sum_{x,y=0}^{w,h} x \cdot pixel_{x,y}}$$

$$y_{m.c.} = \frac{m_{dx}^{11}}{m_{dx}^{10}} = \frac{\sum_{x,y=0}^{w,h} x \cdot y \cdot pixel_{x,y}}{\sum_{x,y=0}^{w,h} x \cdot pixel_{x,y}}$$

Полученные после нормировок данные объединяются в один трехмерный массив и используются далее для проведения томографической реконструкции.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКТА МЕР ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ КМФ В ОБЛАСТИ ЛАБОРАТОРНОЙ МЕДИЦИНЫ

Н.Ю. Грязских, Н.П. Муравская, М.М. Чугунова

ФГУП «ВНИИОФИ», Москва

В лабораторной медицине с каждым годом растет количество применяемых средств измерений, в основе принципа работы которых лежит эффект люминесценции, в частности, оборудование, предназначенное для анализа жидких биопроб (жидкостные флуорометрические анализаторы, спектрофлуориметры, люминометры, цитофлуориметры, ПЦР-анализаторы и т.д.) в связи с тем, что методы исследования флуоресценции конкретных веществ обладают высокой чувствительностью и высокой скоростью исследований по сравнению с другими методами.

С целью метрологического обеспечения указанных выше приборов во ФГУП «ВНИИОФИ» разработан Комплект мер флуоресценции КМФ.

Комплект мер КМФ состоит из четырёх мер флуоресценции, которые представляют собой водный раствор флуоресцеина. Применение комплекта мер флуоресценции позволяет метрологически обеспечить ряд средств измерений, длина волны возбуждения которых лежит в диапазоне от 200 до 500 нм и длина волны регистрации лежит в диапазоне от 470 до 670 нм.

В результате проведенных исследований в процессе разработки мер было установлено что интенсивность флуоресценции на длине волны 513 нм прямо пропорциональна концентрации красителя, по крайней мере, в области $0,001-1 \text{ мг/дм}^3$ при возбуждении в диапазоне 345-420 нм с точностью не хуже 95 %. В эту область попадают длины волны широко распространённых YAG: Nd лазера, работающего на третьей гармонике (355нм), и фиолетового GaN лазерного диода (405 нм), что чрезвычайно важно, поскольку позволяет использовать флуоресцеин для испытаний на линейность устройств с монохроматическим возбуждением на основе подобных источников.

В базовый комплект мер флуоресценции включены следующие меры:

№ меры	Интенсивность излучения на длине волны 513 нм при возбуждении 405 нм, RFU (отн. ед. флуоресценции)	Концентрация флуоресцеина, мг/дм ³
1	1	1
2	0,1	0,1
3	0,01	0,01
4	0,001	0,001

Интенсивность излучения меры флуоресценции с концентрацией флуоресцеина 1 мг/дм³ на длине волны 513 нм при возбуждении 405 нм с целью обеспечения единства измерений приписано значение 1 RFU (отн. ед. флуоресценции).

Комплекты мер флуоресценции КМФ зарегистрированы в Федеральном фонде по обеспечению единства измерений в качестве средства измерений, номер в реестре 56936-14.

Комплекты мер флуоресценции КМФ запатентованы Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, Патент на полезную модель №145762.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КАЛИБРОВКИ ИСТОЧНИКА
ПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДАТЧИКЕ ПОСТОЯННОГО
ДАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ КАЛИБРОВКИ ТОНОМЕТРА
ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ**

М.М. Ермаков¹, М.О. Ваничкина²

1) Младший научный сотрудник, ФГУП ВНИИОФИ, Москва

2) Магистрант второго года обучения, МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва

Измерение внутриглазного давления (ВГД) необходимо для диагностики, лечения и контроля за течением такого тяжелого заболевания, как глаукома, а также позволяет объективно оценить состояние глазного яблока в целом.

Инструментальные методы измерения ВГД называются тонометрией, а приборы для измерения ВГД называются тонометрами. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 8612-2010 единица измерения ВГД – мм рт. ст., а абсолютная погрешность измерений ВГД не должна превышать ± 5 мм рт. ст.

В последнее время большое распространение получила бесконтактная тонометрия.

Обобщённый принцип работы бесконтактного тонометра основан на выпуске потока воздуха, направленного на вершину роговицы, давление которого возрастает с течением времени. Роговица освещается параллельным пучком света, который отражается от неё и улавливается датчиком (фотоприёмником). ВГД определяется по давлению потока воздуха в момент уплощения роговицы. В этот момент наблюдается резкое увеличение амплитуды сигнала, снимаемого с фотоприёмника.

Современные бесконтактные тонометры сильно отличаются друг от друга и по конструктивному решению, и по эргономике, и по встроенному программному обеспечению, с помощью которого определяется ВГД в соответствии со всеми параметрами, полученными прибором во время измерения. Однако все тонометры данного типа объединяет то, что они

воздействуют на глаз потоком воздуха с переменным давлением и определяют ВГД по реакции глаза на данное воздействие. Следовательно, при калибровке прибора, особое внимание следует уделять давлению воздушного потока, выходящего из сопла тонометра. Поэтому для калибровки бесконтактных тонометров было решено использовать датчик давления (электронный тензопреобразователь), который, в свою очередь, будет входить в эталонный комплекс. Но серийно выпускаемые датчики обладают плоской и матовой измерительной поверхностью, поэтому возникает проблема получения результата измерения. Т.к. поверхность датчика не обладает достаточными кривизной, гибкостью и отражающей способностью, требуемая деформация поверхности и корректное отражение падающего пучка света происходить не будут. Следовательно, пики сигнала уплощения наблюдаться не будут. Кроме того, большинство кристаллических тензопреобразователей, рассчитанных на измерение небольшого диапазона давления (в пределах от 0 до 10 кПа) с высокой точностью (предел допускаемой абсолютной погрешности = 15 Па) и имеющих небольшие габаритные размеры и массу, предназначены для измерения постоянного давления. Также датчики давления такого типа обладают определённой задержкой при измерении (хотя и был выбран датчик со сравнительно малым временем отклика - 1 мс). Перечисленные выше особенности датчиков приводят к тому, что с их помощью невозможно отследить все значения давления потока воздуха, создаваемого соплом бесконтактного тонометра.

Для калибровки прибора, создающего переменное (динамическое) давление, датчиком, измеряющим давление постоянное (статическое) предлагается найти 3 контрольные точки, в которых и следует контролировать давление, создаваемое тонометром. Точки были выбраны, исходя из медицинских соображений: у большинства пациентов ВГД находится в диапазоне от 5 до 30 мм рт.ст. А точность самих бесконтактных

тонометров - +/- 5 мм рт.ст. Следовательно, логично в качестве контрольных точек выбрать значения давления: 10, 20 и 30 мм рт. ст.

Так же в качестве рабочих эталонов рационально будет использовать резиновые искусственные глаза - носители тех же значений: 10, 20 и 30 мм рт.ст.

Для решения же проблемы отсутствия у тензопреобразователя необходимых отражательных свойств и невозможности его уплощения было разработано специализированное электронное устройство, позволяющее использовать для компарирования серийный бесконтактный тонометр, в качестве которого был выбран тонометр модели Reichert 7 CR производства компании Reichert. С помощью данного устройства тонометр же и калибруется на датчике давления Курант Ди производства фирмы «Метроник».

Устройство (рис. 1) имитирует поступление электрического сигнала от блока контроля уплощения роговицы на главный контроллер тонометра, который анализирует поступающий сигнал и регулирует давление в камере 4, а также отслеживает показания датчика давления 7, по которым в дальнейшем и высчитывает истинное значение внутриглазного давления. Также возможна реализация устройства, когда имитируется не электрический сигнал, приходящий на главный микроконтроллер тонометра, а световой импульс, приходящий на фотоприёмник 9, причём импульс света создаётся светодиодом, включённым во второй вариант реализации устройства, строго в те моменты, когда на датчике давления создаются давления со значениями: 10, 20 и 30 мм рт.ст. Воздух, выпускается из сопла 2 в центр измерительной поверхности тензодатчика, показания с которого и считывает данное устройство.

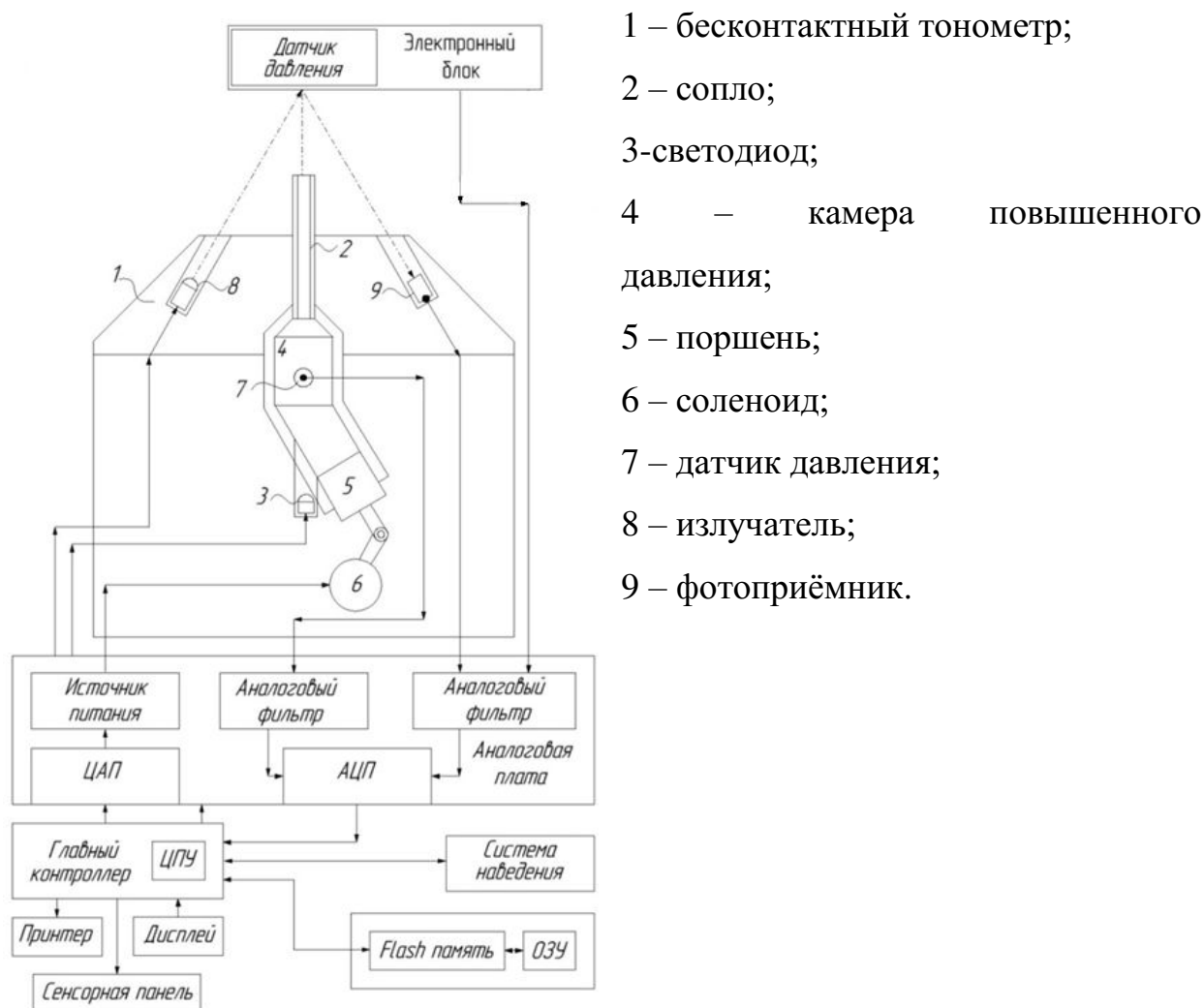


Рис. 1 – Блок-схема подсоединения специализированного электронного устройства калибровки тонометра-компаратора к бесконтактному тонометру

Разработанный метод позволил реализовать на практике калибровку бесконтактных тонометров, выпускающих в процессе измерения из сопла поток воздуха переменного давления, на датчиках постоянного давления.

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕПАРАТОВ КУЛЬТУР КЛЕТОК,
ИНФИЦИРОВАННЫХ ХЛАМИДИЯМИ**

О.А. Артюхова¹, А.В. Самородов¹, Д.А. Добролюбова¹,

Л.В. Диденко², Е.А. Кост², Н.А. Зигангирова²

¹ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

²ФНИЦ ЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, Москва

Чрезвычайно высокий уровень распространенности хламидийной инфекции, вызываемой *S. trachomatis*, и частота вызываемых ею осложнений обуславливают важную роль методов лабораторной диагностики в своевременном и эффективном лечении этого заболевания [1, 2].

Для организации борьбы с хламидийной инфекцией необходимо не только определить факт инфицирования организма *S. trachomatis*, но и подобрать правильную медикаментозную терапию, включая определение чувствительности бактерий к антибиотикам, а также осуществить контроль ее эффективности. Одним из основных методов решения этих задач является культуральный метод, заключающийся в пассаже возбудителя в культуре клеток и последующем выявлении хламидий методом прямой иммунофлуоресценции с использованием флуоресцентного микроскопа [1, 2]. Такое исследование обычно проводится визуально врачом-лаборантом, оказывая негативное влияние на его зрение и занимая много времени, что приводит к малому объему выборки визуально анализируемых клеток и, как следствие, низкой достоверности получаемых результатов.

Для преодоления указанных недостатков культурального метода нами разработан программный комплекс, предназначенный для автоматизированного исследования препаратов клеточной культуры фибробластов линии McCoу, зараженных *S. trachomatis* и обработанных по прямому методу иммуномечения с использованием конъюгатов антител к *S. trachomatis* с FITC. Комплекс позволяет проводить анализ серии

изображений, зарегистрированных во флуоресцентном микроскопе, в автоматическом и интерактивном режимах. Программный комплекс обеспечивает выполнение следующих функций: установление факта наличия хламидийных включений в клетках; сегментация хламидийных включений и клеток с возможностью ручной корректировки ее результатов; расчет морфологических параметров каждого включения, а также их статистик по всем включениям для анализируемой серии изображений; расчет поверхностной плотности хламидийных включений; формирование отчета с результатами анализа. Рабочее окно программы приведено на Рис. 1.

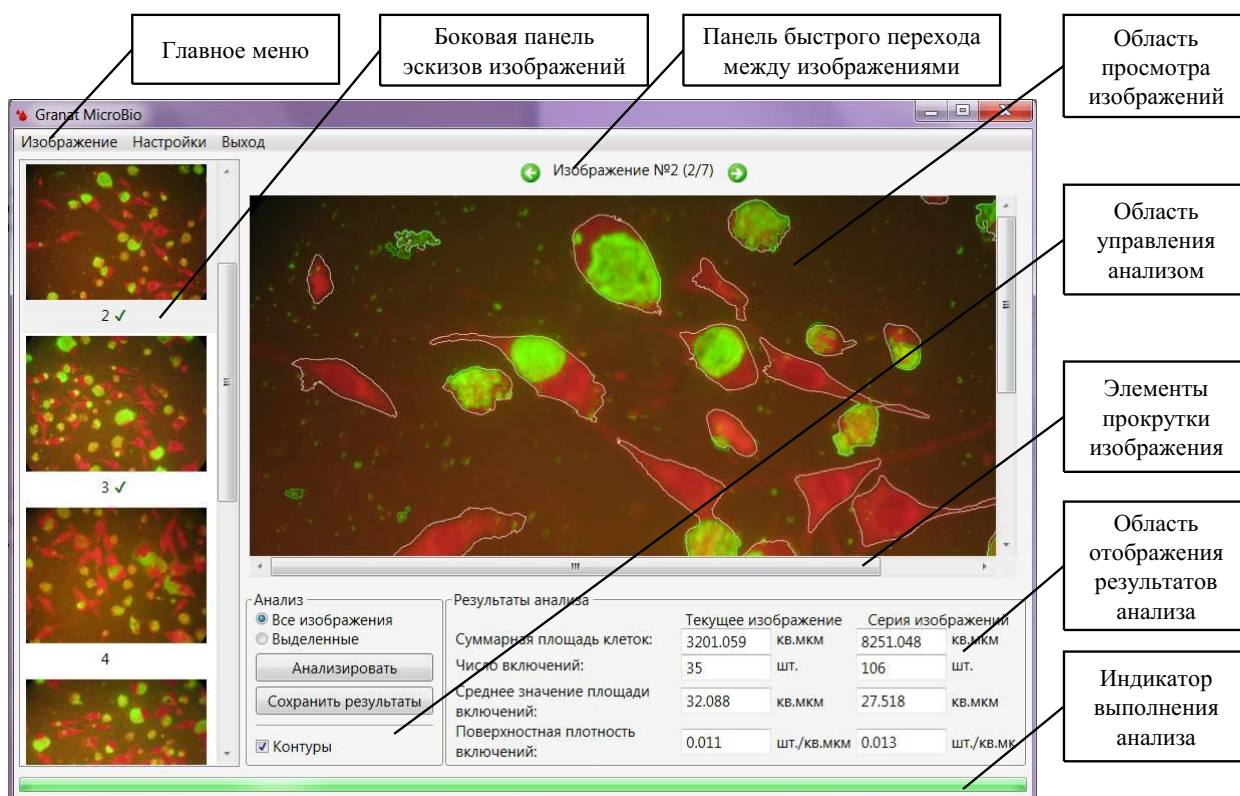


Рисунок 1 – Рабочее окно программы

Разработанный нами и интегрированный в программный комплекс алгоритм сегментации изображений основан на модифицированном методе цветовой деконволюции, позволяющем вычислять профили концентрации используемых красителей, и ускоренном алгоритме бинаризации по методу Ниблэка [3]. Результаты исследования предложенного алгоритма сегментации, проведенные на базе ФНИЦ ЭМ им. Н.Ф. Гамалеи, показали,

что относительная погрешность определения площади хламидийных включений не превышает 3 %, а относительная погрешность определения площади клеток не превышает 5,2 % с уровнем доверия 95 %. Обусловленные ошибками сегментации вероятность ложного обнаружения хламидийных включений не выше 0,3 % , а вероятность обнаружения хламидийных включений – не ниже 99,9 %.

В качестве количественных параметров, характеризующих степень инфицирования клеток, нами было предложено использовать среднее значение и среднеквадратичное отклонение площади хламидийных включений, а также поверхностную плотность хламидийных включений, рассчитываемую как отношение числа присутствующих в препарате хламидийных включений к общей площади клеток в препарате. Проведенные исследования [4] подтвердили информативность и пригодность данных параметров для количественного описания степени инфицирования клеток в задачах исследования эффективности антибактериальных веществ.

Список литературы

1. Якубович А. И., Корепанов А. Р. Урогенитальный хламидиоз. – Иркутск: Полиграфический центр «РИЭЛ», 2007. 108 с.
2. Гранитов В. М. Хламидиозы. М.: Медицинская книга; Н. Новгород: Изд-во НГМА, 2002. 192 с.
3. Артюхова О.А., Самородов А.В. Разработка алгоритма автоматической сегментации флуоресцентно-микроскопических изображений препаратов клеточных культур для задач микробиологии // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 6. DOI: [10.7463/0613.0574140](https://doi.org/10.7463/0613.0574140).
4. Артюхова О.А., Самородов А.В., Кост Е.А., Диденко Л.В., Зигангирова Н.А. Автоматизация исследования культур клеток, инфицированных хламидиями, во флуоресцентном микроскопе // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады XI МНТК с элементами научной молодежной школы, Владимир, 1-3 июля 2014 г. Владимир, 2014. Книга 2. С. 113-117.

БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРМОНАЛЬНОГО СТАТУСА РАКА МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ИММУНОЦИТОХИМИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ

Д.А. Добролюбова, Т.А. Кравцова, А.В. Самородов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Рак молочной железы (МЖ) занимает лидирующее место по заболеваемости и смертности среди онкологических заболеваний [1]. Биологические особенности опухолей МЖ позволяют в большинстве случаев эффективно использовать гормональную терапию в качестве самостоятельного лечения при люминальном А типе рака МЖ и в качестве дополнительной терапии при других молекулярных типах рака [2]. Эффективность гормонотерапии определяется гормональным статусом опухоли, устанавливаемым по результатам иммуноцитохимического (ИЦХ) исследования образцов клеток, взятых из опухолевого очага.

В ходе ИЦХ исследования цитологический препарат окрашивается на рецепторы эстрогенов (РЭ) или прогестерона (РП), в результате чего ядра клеток, содержащие искомые рецепторы, окрашиваются коричневым цветом, не содержащие – голубым (рисунок 1а). По результатам визуального микроскопического анализа определяются баллы Proportion Score (PS) и Intensity Score (IS). PS характеризует долю клеток, содержащих исследуемые рецепторы, а IS – интенсивность окрашивания коричневых областей (рисунок 1б). Положительный статус определяется при значении суммы PS и IS (балл Total Score, TS) больше двух [3]. Визуальное определение указанных баллов сопряжено с субъективностью, в том числе, восприятия цвета, низкой скоростью анализа. Решить указанные проблемы позволяет автоматизация процесса микроскопического исследования ИЦХ препарата.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана биотехническая система (БТС) определения гормонального статуса рака МЖ по изображениям ИЦХ препаратов. Техническая компонента данной системы включает микроскоп

проходящего света, цифровую видеокамеру, автоматизированный предметный стол, привод автофокусировки, блок управления сканированием, персональный компьютер и специализированное программное обеспечения (СПО). СПО реализует различные режимы автоматического сканирования ИЦХ препарата, включая автофокусировку [4], а также обработку и анализ изображений ИЦХ препаратов, результатом которой являются баллы PS, IS и TS [5].

Реализованный в СПО алгоритм обработки и анализа изображений основан на модели спектрального пропускания оптического излучения видимого диапазона красителями, избирательно накапливающимися в ядрах клеток опухоли. Причем коричневые области (области, содержащие исследуемые рецепторы) содержат и голубой, и коричневый краситель, что обусловлено процедурой приготовления ИЦХ препаратов и приводит к необходимости разделения вклада красителей в формирования цвета изображения для правильной интерпретации результатов окрашивания.

Программное разделение вклада красителей в формирование цвета требует наличия предварительного этапа цветовой коррекции изображения, позволяющего устранить влияния настроек цифровой видеокамеры и спектра излучения осветительной системы микроскопа. С целью выбора метода цветовой коррекции изображений ИЦХ препаратов и формирования калибровочной палитры были проведены исследования 8 методов цветовой коррекции [6, 7] с использованием светофильтров из стандартного набора цветного оптического стекла и калибровочной мишени Kodak IT8.7/1 (ISO 12641). По результат исследований сформирована калибровочная палитра и выбран метод цветовой коррекции изображений ИЦХ препаратов.

Список литературы

1. Злокачественные новообразования в России в 2012 году (заболеваемость и смертность) / Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2014. – 250 с.
2. Практические рекомендации по лечению злокачественных опухолей Российского общества клинической онкологии / под ред. В.М. Моисеенко: [Электронный ресурс] // Интернет-портал российского общества клинической онкологии. URL. <http://www.rosoncoweb.ru/standarts/RUSSCO/>. Проверено: 18.03.2015.
3. Allred D.C. Assessment of prognostic and predictive factors in breast cancer by immunohistochemistry // Connection. – 2006. – №9. – P. 4-5
4. Артюхова О.А., Самородов А.В. Сравнительное исследование характеристик резкости микроскопических изображений медико-биологических препаратов // Медицинская техника. – 2011. – № 1. – С.15-22.
5. Самородов А.В., Артюхова О.А., Добролюбова Д.А., Клименко Н.С., Амелькина Е.Ю., Войнова Н.А., Славнова Е.Н. Автоматизированный комплекс определения гормонального статуса рака молочной железы методом иммуноцитохимии // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. Эл № ФС 77–48211. – 2013. – № 12. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/628098.html>.
6. Wang X., Zhang D. An optimized tongue image color correction scheme//IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 14, no. 6, pp. 1355–1364, 2010.
7. Pham B., Pringle G. Color correction for an image sequence // IEEE Computer Graphics and Applications. 1995. Vol. 15, No. 3. P. 38-42.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОНТРАСТА ИНФРАКРАСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА

А.В. Колпаков, И.Н. Спиридонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

По статистике Всемирной организации здравоохранения частота поражения пародонта воспалительными заболеваниями составляет от 80 до 100 % в 53 странах.

Инвазивный характер существующих методов диагностики тканей пародонта, их неэффективность при обнаружении воспаления на стадии первичного повреждения и контроля эффективности проведенного курса лечения создают предпосылки для разработки оптических методов обнаружения воспаления в мягких тканях пародонта.

В работах И.Н. Спиридонова, R.S. Jones, показана возможность визуализации в ближнем инфракрасном (далее – ИК) диапазоне длин волн мягких и твердых тканей ротовой полости методом диафаноскопии.

В настоящей работе представлены результаты разработки методики оценки контраста инфракрасных изображений тканей пародонта для обнаружения раннего повреждения мягких тканей пародонта и контроля динамики воспалительного процесса.

На ИК изображениях воспаленных мягких тканей пародонта (далее – МТП) различаются участки гиперемии и дистрофии эпителия (Рисунок 1), характерные для стадии первичного и раннего повреждения МТП.

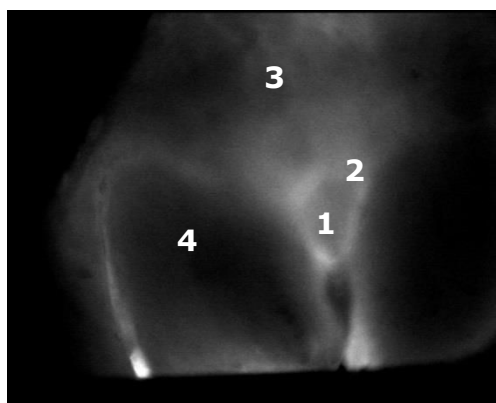


Рисунок 1 Инфракрасное изображение воспаленного участка тканей пародонта: 1 – область гиперемии в межзубном сосочки; 2 – область дистрофии эпителиальной ткани межзубного сосочка; 3 – прикрепленная десна; 4 – поверхность зубов

Вероятность обнаружения воспаленного участка на ИК изображении тканей пародонта определяется в первую очередь коэффициентом контраста воспаленного участка МТП:

$$C_a = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (1)$$

где I_{max} – интенсивность излучения, прошедшего область дистрофии эпителиальной ткани, I_{min} – интенсивность излучения, прошедшего область гиперемии.

Для определения методики расчета коэффициента контраста C_a определены характерные размеры указанных областей гиперемии и дистрофии на изображениях МТП.

Следовательно, минимальное количество пикселей на изображении МТП для расчета коэффициента контраста области гиперемии относительно области дистрофии МТП должен составлять $R_S = S_{H_{min}} = 4$ пикс.

В целях выбора методики расчета коэффициента контраста C_a проанализированы профили интенсивности воспаленного участка МТП в нескольких направлениях (Рисунок 2).

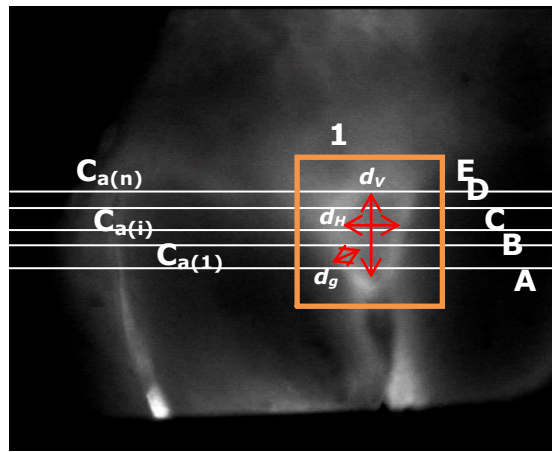


Рисунок 2 - Изображение воспаленного участка МТП: А, В, С, D, Е – сечения изображения. 1 – Область интереса: размеры области гиперемии в межзубном сосочке: $d_v = 3,2$ мм; $d_H = 2,2$ мм, поперечный размер области дистрофии эпителия в межзубном сосочке: $d_g = 0,4..0,6$ мм.

В целях определения минимального количества направлений для расчета коэффициента контраста области дистрофии относительно области гиперемии МТП $\langle C_a \rangle$ проведено исследование его значения от количества направлений сечений m , используемых для расчета:

$$\langle C_a \rangle(m) = \frac{\sum_{j=1}^m C_{a(j)}}{m} \quad (2)$$

где $C_{a(j)}$ – усредненное по n сечениям в заданном направлении j значение коэффициента контраста, рассчитываемое по формуле:

$$C_{a(j)} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{a(i)}}{n}, j = 1..n \quad (3)$$

В результате исследований, выполненных на серии из 30 изображений установлено, что значение коэффициента контраста C_a области дистрофии относительно области гиперемии на ИК изображениях МТП составляет 0,18..0,42. Установлено также, что при для достижения максимальной точности оценки при расчете коэффициента контраста C_a целесообразно усреднять значения C_a по двум направлениям сечений.

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ ЛИЦА ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЮ

А.А. Таранов*, И.Н. Спиридонов*

*кафедра «Биомедицинские технические системы» МГТУ им. Н.Э.

Баумана, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5,

pi-null-mezon@yandex.ru

Цифровое видеоизображение представляет собой упорядоченный во времени набор 2-мерных пространственных распределений освещённости матричного фотоприёмника. Шаг дискретизации этого распределения определяется количеством светочувствительных элементов фотоприёмника, а набор возможных значений так называемым яркостным разрешением, меньшим или равным разрядности аналого-цифрового преобразователя видеокамеры. Информация о спектральном составе освещения чаще всего сохраняется аддитивным способом в виде трёх независимых измерений освещённости в трёх диапазонах длин волн видимого света. В настоящее время подавляющее большинство цифровых видеокамер общего назначения поддерживает формат видеосъёмки VGA* RGB 8-bit с частотой выборок 30 кадров в секунду. Мы продемонстрируем, что статистический подход к обработке таких видеоизображений позволяет использовать видеокамеры потребительского уровня для измерения оптической плотности кожных покровов лица.

Известно, что пульсовый характер движения крови по артериям организма и связанный с ним эффект периодического изменения светопоглощающих свойств кожных покровов используется в медицине для неинвазивной диагностики сердечно-сосудистых заболеваний [1]. В основе такой диагностики лежит сигнал фотоплетизмограммы, который представляет собой упорядоченный набор измерений оптической плотности кожных покровов. Чаще всего сигнал регистрируется при просвечивании

* Специфицирует размер ширины (640) и высоты (480) изображения в пикселях

пальцев рук или мочки уха, но существуют датчики, измеряющие интенсивность отражённого от кожи света. Особенностью сигнала фотоплетизмограммы является наличие пульсирующей и медленно изменяющейся компонент. При этом, обычно, амплитуда пульсирующей компоненты составляет не более 5 % от абсолютной величины сигнала, но именно пульсирующая компонента представляет интерес для диагностики заболеваний [1].

Номенклатура медицинских приборов, работа которых основана на регистрации и анализе сигнала фотоплетизмограммы постоянно расширяется: улучшаются методы фильтрации помех, увеличивается разрядность аналого-цифровых преобразователей и т.п. Однако, на рынке потребительской электроники уже несколько десятилетий присутствуют известные всем цифровые видеокамеры, которые, как оказывается, пригодны для регистрации сигнала фотоплетизмограммы и, в то же время, обладают на порядок меньшей по сравнению с медицинскими приборами стоимостью.

Покажем, что для регистрации сигнала фотоплетизмограммы может быть использована рядовая 8-битная веб камера. Для этого будем считать, что веб камера регистрирует видеоизображение участка кожи и этому участку соответствует некоторая величина коэффициента отражения $K(x, y, t)$. При этом световой поток, освещающий объект, не изменяется значимо во время видеосъёмки. В этом случае, отклик $V(x, y, t)$ светочувствительных элементов фотосенсора веб камеры прямо пропорционален величине коэффициента отражения (1):

$$V(x, y, t) = \alpha \cdot K(x, y, t), \quad (1)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Договоримся о том, что регулировкой веб камеры мы добились того, что средняя по времени величина отклика равна 2^{m-1} , где m – разрядность цифрового изображения. В случае рядовой веб камеры $m = 8$, значит, средний отклик кодируется числом 128. Пульсации $K(x, y, t)$, обусловленные

движением крови по артериям и артериолам кожи, вызовут соответствующие пульсации отклика веб камеры. Амплитуда этих пульсаций, при 5 % пульсации коэффициента отражения, может быть оценена (2):

$$\Delta V = 2^{m-1} \cdot 0,002 = 128 \cdot 0,005 = 0,64 . \quad (2)$$

Очевидно, что отдельно взятый светочувствительный элемент с 8-битным яркостным разрешением не может измерить столь малое изменение, так как его абсолютная погрешность не менее 0,5 величины яркости пикселя. Однако, по сути, при выборке каждого кадра веб камера выполняет не одно измерение, а N равноточных и независимых измерений, где N – количество светочувствительных элементов, регистрирующих изображение кожи. В таком случае, согласно математической статистике известно, что для выборочного среднего выполняется (3):

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} , \quad (3)$$

где $\sigma_{\bar{x}}$ – среднеквадратическое отклонение выборочного среднего измерений,

σ_x – среднеквадратическое отклонение единичного измерения.

Таким образом, усредняя на каждом кадре видеоизображения отклики всех светочувствительных элементов, изображающих кожу, мы уменьшаем неопределённость измерения их среднего значения. Другими словами, увеличивая N , мы добьёмся чувствительности необходимой для измерения ΔV . Сделанные нами допущения, однако, предсказывают, что абсолютная погрешность измерения выборочного среднего может быть уменьшена неограниченно, что не соответствует действительности (см. рисунок 1).

Рисунок 1 демонстрирует результаты эксперимента по измерению зависимости $\sigma_{\bar{x}}$ от N , в ходе которого веб камера регистрировала изображение эталонного стационарного объекта, каждое значение $\sigma_{\bar{x}}$ рассчитано по 300 измерениям \bar{x} . Как видно убывание $\sigma_{\bar{x}}$ лишь приблизительно соответствует формуле (3). Наиболее существенное

различие в том, что в реальных условиях при увеличении N , $\sigma_{\bar{x}}$ достигает некоторого минимального отличного от нуля значения.

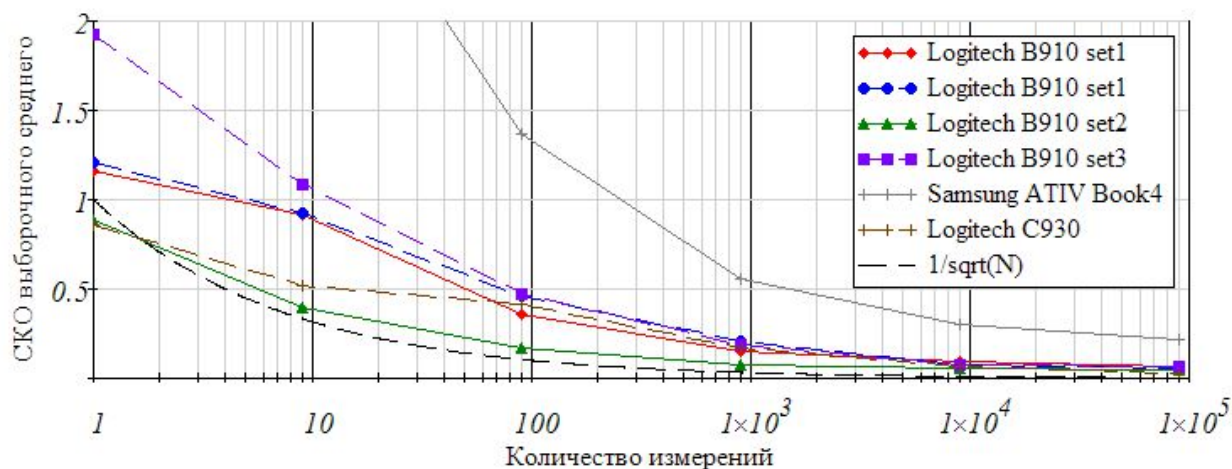


Рисунок 2 – Экспериментальный вид зависимости величины среднеквадратического отклонения от количества измерений для нескольких моделей веб-камер

Для фиксированного значения N , величина $\Delta_I = 2 \cdot \sigma_{\bar{x}}$ является абсолютной погрешностью измерения коэффициента отражения кожи приведённой к яркости пикселей. Например, для веб камеры Logitech B910 и площади проекции кожных покровов на видеоизображении 90 000 пикселей величина Δ_I с 95 % вероятностью находится в интервале $0,116 \pm 0,039$. Такого значения уже достаточно для того, чтобы достоверно разрешить измерение ΔV .

Чтобы экспериментально проверить это утверждение мы, используя подход авторов работы [2], осуществили регистрацию сигнала фотоплетизмограммы кожных покровов лица при помощи веб камеры Logitech B910. Пример зарегистрированного таким способом сигнала приведён на рисунке 2. Таким образом, функционала рядовой веб камеры потребительского уровня достаточно для регистрации фотоплетизмограммы.

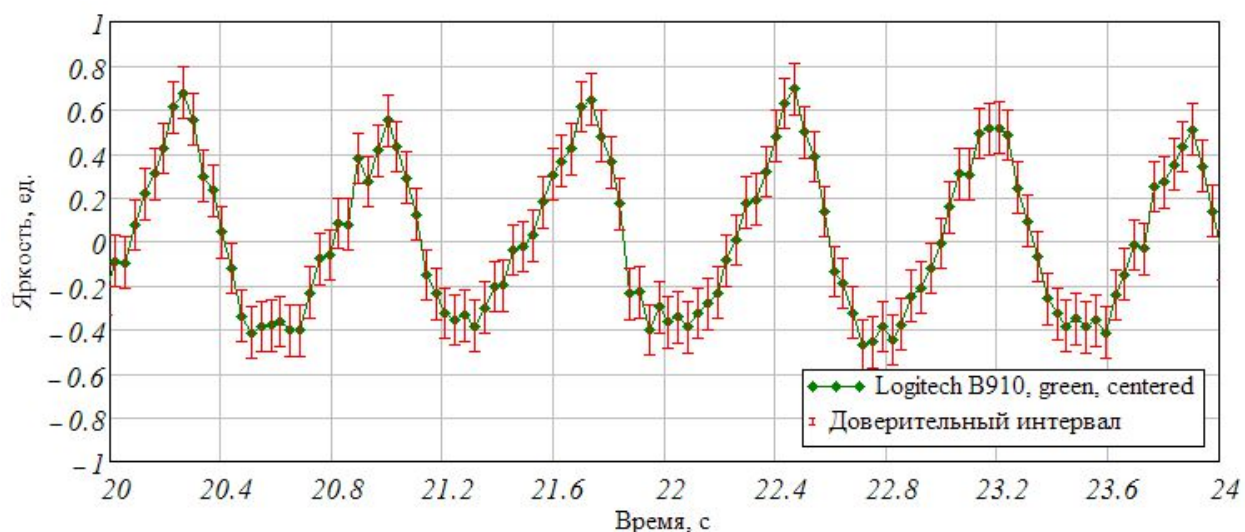


Рисунок 3 – Пример отрезка фотоплетизмограммы, зарегистрированной при помощи веб камеры

Список литературы

1. John Allen, «Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement», *Physiol. Meas.* 28 (3), 1-39, 2007;
- А. А. Таранов, И. Н. Спиридонов, «Регистрация фотоплетизмограммы и измерение частоты артериального пульса при помощи вебкамеры», *Биомедицинская радиоэлектроника* 10, 71-80 (2014).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЛИЦА НА ОСНОВЕ ТЕКСТУРНЫХ ДЕСКРИПТОРОВ

М.Н. Пилипенко, Е.Ю. Латышева

НИИЦ БТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Человек воспринимает окружающую действительность с помощью различных органов чувств. Наибольшей информационной пропускной способностью обладают зрение и слух. При этом через зрительный канал передается в 2,5 раза больше информации, чем через слуховой. Лицевая экспрессия, передаваемая посредством мимики, является одним из основных информационных сигналов [1].

В настоящее время проводятся активные исследования по использованию автоматизированного анализа мимики в медицине при анализе депрессии, расстройств аутистического спектра [2], позитивных симптомов шизофрении [3], невербальных проявлений при болевых синдромах [2], в сфере безопасности при определении состояния человека-оператора [4], предрасположенности людей к девиантному поведению [5], а также в криминалистике при портретной экспертизе [1].

Система кодирования лицевых движений FACS, разработанная Р. Ekman и W. Friesen [6], позволяет классифицировать анатомически и физиологически обусловленную двигательную активность лица, выделяя ограниченный набор двигательных единиц, Action Units (AUs): 9 AUs в верхней части лица, 18 AUs в нижней части лица, 20 двигательных дескрипторов глаз и головы. Анализ AUs заключается в определении наличия или отсутствия AUs на данном кадре, а также оценке интенсивностей AUs. В работе проводился анализ наличия или отсутствия AUs, которые могут быть использованы для определения предрасположенности человека к противоправным действиям [5]: Au4, Au17, Au25, Au26.

Цель работы заключалась в сравнении алгоритмов машинного обучения с использованием текстурных дескрипторов LBP, LPQ, WLD и различных классификаторов статистического пакета Statistics Toolbox среды MatLab2014a для решения задачи распознавания четырех двигательных единиц лица.

В работе использовалась аннотированная база видеоизображений MMI [7], содержащая выражения спонтанных эмоций. Для обучения и тестирования алгоритмов были отобраны изображения, на которых присутствовали согласно аннотации интересующие AUs (табл. 1).

Таблица 1 – Изображения для обучения и тестирования AUs

Двигательная единица	Количество изображений
AU4	3535
AU17	4061
AU25	4622
AU26	4057

Для выделения области лица к изображению применялся детектор P. Viola and M.J. Jones [8], изображение лица масштабировалось до размера 200x200.

Для вычисления текстурного дескриптора LBP использовалась реализация алгоритма [9]. Дескриптор применялся ко всей области лица. Столбцы с нулевыми значениями не учитывались, тем самым сокращалось число признаков. После применения текстурного дескриптора LBP область лица разделялась на 10x10 областей (рис.1). Для исследования использовались как область лица, так и области бровей и рта.

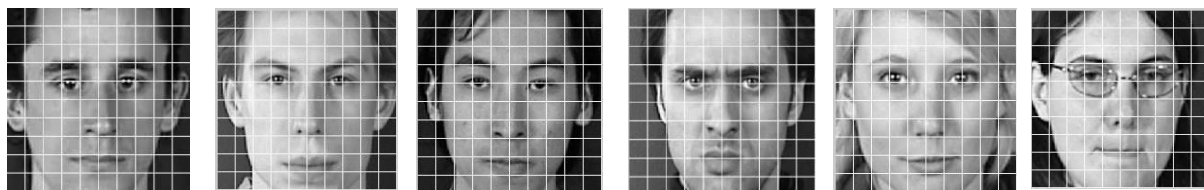


Рисунок 1 – Примеры деления области лица на 100 областей

Для вычисления текстурных дескрипторов LPQ и WLD были использованы реализации алгоритмов соответственно [10] и [11], для исследования использовались области бровей и рта.

Результаты тестирования по изображениям базы данных MMI показали, что наилучшие показатели распознавания двигательных единиц получаются при использовании текстурного дескриптора WLD и классификаторов Quadratic KNN, Fit discriminant analysis classifier, Ensemble Methods (numberTree=100) со свойством AdaBoostM1, Ensemble Methods (numberTree=100) со свойством LogitBoost.

С точки зрения быстродействия классификаторы Quadratic KNN и Fit discriminant analysis classifier показали лучшие результаты, чем классификатор Ensemble Methods.

Список литературы

1. В.Г. Булгаков Методические основы криминалистической идентификации и диагностики человека по его диагностическим признакам. М.:Юрлитинформ, 2014. 143 с.
2. Michel Valstar Automatic Behaviour Understanding in Medicine, Proc. Int'l Conference Multimodal Interaction (workshop section), 2014.
3. Alvino, C., Kohler, C., Barrett, F., Gur, R.E., Gur, R.C., Verma, R. Journal of Neuroscience Methods, (2007), 163 (2), pp. 350-361. doi: 10.1016/j.jneumeth.2007.03.002 Computerized measurement of facial expression of emotions in schizophrenia
4. Л.А. Хрисанфова Динамика восприятия экспрессии лица // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Социальные науки. / Нижегородский ун-т. – 2003. – Вып. 1
5. Бойко А.А. Подходы к автоматизированному определению склонности человека к противоправным действиям по мимическим проявлениям // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: Доклады XI МНТК с элементами научной молодежной школы, Владимир, 1-3 июля 2014 г.– Владимир, 2014. – Книга 2. – С. 36-39.
6. P. Ekman, W. Friesen, and J. Hager, Facial Action Coding System (FACS): Manual. A Human Face, 2002.
7. Valstar M.F., Pantic M. Induced Disgust, Happiness and Surprise: an Addition to the MMI Facial Expression Database, in Proceedings of Int'l Conf. Language Resources and Evaluation, Workshop on EMOTION, Malta, 2010, pp. 65-70.
8. P. Viola and M.J. Jones, «Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features», proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), 2001.
9. Matlab codes for Local Binary Patterns. Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36484-local-binary-patterns>, (дата обращения 01.08.2014).

10. Matlab codes for Local Phase Quantization. Режим доступа: <http://www.cse.oulu.fi/CMV/Downloads/LPQMatlab?action=AttachFile&do=view&target=lpq.m>, (дата обращения 01.08.2014).

11. Matlab codes for Weber's Law Descriptor. Режим доступа: <http://www.cse.oulu.fi/CMV/Research/NewTextureDescriptors>, (дата обращения 01.08.2014).

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕИНВАЗИВНЫХ ГЕМОГЛОБИНОМЕТРОВ

**А.В. Иванов, Н.П. Муравская, Е.А. Рекстина, М.А. Солодилова
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва**

При проведении исследования гемоглобина в крови человека используется как инвазивный, так и неинвазивные методы измерений. Преимуществом инвазивного метода является его чувствительность, точность, но недостатком является необходимость прокалывания пальца пациента, что может привести к негативным влияниям на организм человека, особенно новорождённого.

Обеспечение единства измерений неинвазивных гемоглобинометров, применяемых в сфере здравоохранения, является важной задачей. Подтверждение метрологических характеристик, заявленных производителем, возможно только с использованием средств поверки, имеющих прослеживаемость к Государственным эталонам.

ФГУП "ВНИИОФИ" была проведена работа по исследованию метрологических характеристик гемоглобинометров на примере неинвазивных гемоглобинометров НАЕМОСПЕКТ, производства «MBR Optical Systems GmbH & Co. KG».

Для подтверждения заявленных производителем характеристик в 2014 году были проведены испытания для целей утверждения типа гемоглобинометров неинвазивных НАЕМОСПЕКТ.

Данный гемоглобинометр предназначен для измерения спектрального коэффициента отражения и последующего перевода полученных данных в значения концентраций гемоглобина при неинвазивных методах. При измерении количества гемоглобина в крови прибором использован фотометрический метод. Луч света, проходя через ткани пальца, рассеивается, поглощается и отражается. Отраженная часть светового потока попадает на высокочувствительный спектрометр. Далее спектральные

данные обрабатываются встроенным программным обеспечением. Оптические характеристики веществ и материалов по известным формулам можно перевести в концентрацию.

В качестве средств поверки для утверждения типа был выбран: Набор отражающих мер координат цвета и координат цветности, входящий в состав Вторичного эталона единиц координат цвета и координат цветности ВЭТ 81-1-2003 , (образцы №№ 17, 18). Образец воспроизводит цвет сосуда, наполненного кровью. В результате проведенных испытаний была разработана программа испытаний и методика поверки, были установлены следующие метрологические характеристики:

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений концентрации гемоглобина, г/дм ³	90÷180
Рабочий диапазон длин волн, нм	500÷1000
Предел относительного среднего квадратического отклонения результатов измерения концентрации гемоглобина, %, не более	3

Были рассчитаны средние арифметические значения концентрации гемоглобина ($C_{срj}$) для мер координат цвета №№17 и 18 по формуле:

$$C_{срj} = \frac{\sum_{i=1}^{10} C_{ij}}{10}$$

где C_{ij} - текущее значение i -го измерения концентрации гемоглобина j -й меры.

Было рассчитано относительное среднее квадратическое отклонение измерения концентрации гемоглобина S_{0j} по формуле:

$$S_{0,j} = \frac{1}{C_{cpj}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (C_{ij} - C_{cpj})^2}{9}} \cdot 100, \%$$

где, (C_{cpj}) - среднее арифметическое значение концентрации гемоглобина для j-й меры;

C_{ij} - текущее значение i-го измерения концентрации гемоглобина j-й меры.

По одному и тому же образцу, с помощью которого проводится поверка, были произведены измерения трёх приборов и проведена оценка среднего квадратического отклонения конкретного прибора и межприборная согласованность (сходимость).

Гемоглобинометры неинвазивные НАЕМОСПЕКТ прошли испытания с положительным результатом и были зарегистрированы в Федеральном фонде по обеспечению единства измерений в качестве средства измерения под номером 57963-14.

В процессе данной работы были разработаны методы и средства метрологического обеспечения точности измерения содержания гемоглобина крови человека неинвазивным методом, и определено, что набор отражающих мер в полной мере обеспечивает возможность проведения поверки с достаточной точностью и достоверностью.

Научное издание

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОТОНИКИ

Тезисы докладов участников научно-технической конференции

Тезисы докладов публикуются в авторской редакции и оформлении

Подписано в печать 01.04.2015 Формат 60x84/8

Печать офсетная. Бумага офсетная

Тираж 100 экз.

Всероссийский научно-исследовательский институт

оптико-физических измерений

ФГУП «ВНИИОФИ»

119361, г. Москва, ул. Озерная, д. 46

Тел: (495) 437-56-33

e-mail: vniofi@vniofi.ru

Сайт: www.vniofi.ru