

# ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ

## Введение

Волоконная оптика основана на явлении полного внутреннего отражения. Свет, попадая внутрь прозрачного волокна, окруженного веществом с меньшим показателем преломления, многократно отражается и распространяется вдоль этого волокна.

Стремление повысить плотность передаваемой через оптоволокно информации и энергии приводит к микро- и даже наноструктурированию его сердцевины, диаметр которой составляет 10 микрон для стандартных одномодовых волокон и 50...100 микрон для многомодовых.

К нанотехнологиям можно отнести технологии, обеспечивающие возможность контролируемым образом создавать и модифицировать наноматериалы, а также осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба. Среди основных составляющих науки о наноматериалах и нанотехнологиях можно выделить следующие: фундаментальные исследования свойств материалов на наномасштабном уровне; развитие нанотехнологий для целенаправленного создания наноматериалов, а также поиска и использования природных объектов с наноструктурными элементами, создание готовых изделий с использованием наноматериалов и интеграция наноматериалов и нанотехнологий в различные отрасли промышленности и науки; развитие средств и методов исследования структуры и свойств наноматериалов, а также методов контроля и аттестации изделий и полуфабрикатов для нанотехнологий.

Цель работы – раскрыть сущность существующих волоконных оптических методов в нанотехнологии.

Задачи работы:

- рассмотреть нанотехнологии для волоконной оптики;
- рассмотреть волоконные оптические методы.

## Содержание

Введение.....	2
1. Нанотехнологии для волоконной оптики.....	4
2. Волоконные оптические методы.....	6
Заключение.....	17
Список использованных источников.....	18

## 1. Нанотехнологии для волоконной оптики

Оптическое волокно — нить из оптически прозрачного материала, используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения [2].

Различают следующие виды: наноструктурированное оптоволокно, полостные волокна, оптоволокно с фотонным кристаллом.

Наноструктурированное оптоволокно может быть изготовлено целиком из одного типа стекла. Внешний слой с низким показателем преломления здесь заменен на большое количество цилиндрических полостей, заполненных определенным газом или просто воздухом: стеклянные капилляры относительно большого размера складываются вместе в желаемую структуру, которая в последствии вытягивается под нагревом в оптоволокно с определенным расположением воздушных полостей, геометрия которых определяется изначальным расположением капилляров. В зависимости от того как реализован механизм полного внутреннего отражения, такие волокна можно разделить на два типа: полостные волокна и волокна на фотонных кристаллах.

Полостные волокна: стеклянная центральная часть окружена набором цилиндрических воздушных полостей, что снижает эффективный показатель преломления и сильно модифицирует эффект полного внутреннего отражения. Поскольку размер воздушных полостей и расстояние между ними сравнимы с длиной волны света, то эффективный показатель преломления будет варьироваться с длиной волны проходящего света. Результатом этого является способность такого оптоволокна нести только одну моду, вне зависимости от длины волны. Такие волокна обычно используются для передачи высоких мощностей света и обладают низкой нелинейностью.

Оптоволокно с фотонным кристаллом использует идею полного внутреннего отражения. Локализация света в центре такого волокна происходит за счет явления интерференции на периодической структуре с

размером порядка длины волны, созданной решеткой цилиндрических полостей — фотонным кристаллом. Идея фотонного кристалла состоит в том, что в периодической структуре лучи света, отраженные от областей с разным показателем преломления, будут интерферировать друг с другом, усиливаясь или ослабляясь в зависимости от соотношения длины волны и периода структуры. Подобные явления придают яркую окраску крыльям некоторых бабочек и голограммам на кредитных карточках. В фотонном кристалле интерференция запрещает распространение для целого диапазона длин волн — в этом случае речь идет о «запрещенной зоне». Такие запрещенные моды (длины волн) будут локализованы в центральной части волокна на всем его протяжении. Таким образом создавать определенную разницу в показателях преломления между внутренней и внешней областями в оптоволокне — выбор материала для внутренней части теперь ничем не ограничен. Более того, чаще всего используются полые волокна с фотонным кристаллом, где свет распространяется внутри воздушной полости в центре волокна. Преимущество таких волокон состоит в бесконечно малой дисперсии, поскольку свет теперь распространяется в практически бездисперсионной среде — воздухе [7].

## 2. Волоконные оптические методы

В настоящее время существует целый ряд методов получения информации о структуре вещества в нанометровом диапазоне измерений. Среди них сканирующая зондовая и электронная микроскопия, различные виды спектроскопии, рентгеноструктурный анализ, ядерный магнитный резонанс и другие.

Представленные в сводной таблице методы являются базой для реализации на их основе различных средств измерений СЗМ.

Основные методы измерений и измеряемые свойства нанообъектов приведены в табл. 1 [9].

Таблица 1. Методы измерений и измеряемые свойства объектов

Наименование метода	Диапазон измерений	Изменяемые свойства
Атомно-силовая микроскопия (АСМ) или сканирующая силовая микроскопия (ССМ)	Глубина: 0,5–5 нм; боковое разрешение: 0,2–130 нм	Топология, неровности поверхности, эластичность поверхности, размер зерна, фрикционные характеристики, удельные молекулярные взаимодействия и магнитные характеристики поверхности, общая плотность состояний (валентных) электронов до фермиуровня на поверхности
Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)	Глубина: 1–5 нм; боковое разрешение: 2–10 нм	Трехмерная топология поверхности: размер, форма, неровности поверхности, дефекты, электронные структуры и местная плотность состояний
Растровая электронная микроскопия (РЭМ)	Глубина: 1 нм–5 мкм; боковое разрешение: 1–20 нм	Топография: характеристики поверхности. Морфология: форма и размер частиц. Состав: элементы и соединения, из которых состоит образец. Кристаллографическая информация: расположение атомов
Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)	Глубина: 200 нм; боковое разрешение: 2–20 нм	Морфология: размер и форма частиц. Кристаллографическая информация: обнаружение дефектов атомной шкалы. Информация по составу: элементы и соединения, из которых состоит образец и информация о присутствующих фазах (замер параметров кристаллической решетки) и ориентация образца
Растровая просвечивающая электронная микроскопия (РПЭМ)	Глубина: 200 нм; боковое разрешение: 2–20 нм	Структурная, химическая и морфологическая информация

## Продолжение таблицы 1.

Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (СОМП)	Разрешение: 50–100 нм	Химические особенности и ориентационная информация
Спектроскопия энергетической дисперсии рентгеновского излучения	0,1 мкм для более тяжелых атомов и 1 мкм для более легких элементов	Концентрация каждого элемента в образце, идентификация осадений в сплавах, активные фазы в катализаторах, элементарная сегрегация на границах зерна, количественный состав многокомпонентных фаз
Рентгеновская абсорбционная спектроскопия (РАС)		Структурная информация (связи, координация, количество)
Спектроскопия одиночных молекул (SMS)		Индивидуальные функциональные характеристики молекулярных систем, такие как, например, перенос возбуждения, разделение заряда и флуоресцентные воздействия
Электронная Оже-спектроскопия (ЭОС)	Глубина: 0,3–3 нм; боковое разрешение 30 нм	Химический анализ: состав поверхностных слоев образца, атомные уровни
Поляризационная спектроскопия		Ориентация возбуждения и миссия; дипольные моменты переходов
Раман-спектроскопия		Химическая информация: концентрация примесей. Вибрационная информация

Разработка стандартов, измерительных технологий для диагностики свойств материалов, мониторинга нанопроцессов, определения параметров средств производства, а также средств анализа структур должна базироваться на современной эталонной базе, использующей в своей основе научные принципы квантовой метрологии. Так, например, во многих случаях невозможно применение контактных средств измерения температуры, использование радиационных термометров требует точного знания излучательной способности объекта. Высокоэффективные нанотехнологические процессы, такие как ионно-плазменное напыление, создание чистых подложек и др., требуют получения и поддержания вакуумной среды и контроля её параметров на уровне нанопаскаля (нПа) [9].

При изучении нанометрических размеров большую часть информации о создании устройств и материалов получают с помощью микроскопии. Чтобы получить больше информации о нанометре, необходимо постоянное

усовершенствование инструментов и оборудования. Используя такой подход, можно не только получить представление о топологии или морфологии нанообъектов, но и определить другие параметры, такие как химический состав, прочность, проводимость и др.

Сканирующий зондовый микроскоп – это инструмент со множеством возможностей. С его помощью можно строить реальные трехмерные изображения с широким динамическим диапазоном, охватывающим традиционные «сферы деятельности» оптических и электронных микроскопов [3]. Это также и профилометр с беспрецедентным разрешением. Сканирующий зондовый микроскоп может измерять различные физические свойства.

Изображения, получаемые с помощью СЗМ, относятся к разряду создаваемых микроскопическими методами образов, которые достаточно легко интерпретировать. В случае электронного или оптического микроскопа принцип получения изображения базируется на сложных электромагнитных дифракционных эффектах. Поэтому иногда могут возникнуть затруднения при определении, является ли некоторый элемент микрорельефа поверхности выступом или впадиной. Напротив, СЗМ регистрирует истинно трехмерные параметры. На СЗМ-изображении выступ однозначно предстает выступом, а впадина ясно видна как впадина. На получаемых при помощи оптических или электронных микроскопов изображениях, например, плоского образца, состоящего из чередующихся отражающих и поглощающих участков, могут возникать искусственные изменения контрастности.

Сканирующая туннельная микроскопия – метод микроскопии, позволяющий изучать электропроводящие поверхности в соответствии с атомной шкалой [9]. СТМ дает картину атомной схемы поверхности путем выявления неровностей в плотности электронов, которые обусловлены положением атомов.

Основное применение СТМ – это измерения топографии. Именно благодаря своей чрезвычайно высокой чувствительности СТМ способен



формировать изображения поверхностей с субангстремной точностью по вертикали и атомным латеральным (т. е. в горизонтальном направлении) разрешением.

Сканирующая туннельная спектроскопия (СТС) является наряду с измерениями топографии другой важной областью приложения СТМ. В первом приближении образ, составленный из значений тока туннелирования, отражает топографию поверхности образца. Если же говорить более точно, туннельный ток соответствует электронной плотности со стояний поверхности. В действительности СТМ регистрирует количество заполненных или незаполненных электронных состояний вблизи поверхности Ферми в диапазоне значений энергии, определяемом прикладываемым рабочим напряжением. Можно сказать, что СТМ измеряет скорее не физическую топографию, а поверхность постоянной вероятности туннелирования.

Чувствительность СТМ к местной электронной структуре может вызвать затруднения, если необходимо картографировать топографию (т.е. получить изображение топографии) [9]. Например, если какой-то участок образца окислен, то, когда острие сканирующей иглы попадет на него, туннельный ток резко уменьшится.

СТМ, работающий в режиме постоянного тока, даст команду острию приблизиться к поверхности, чтобы поддержать установленную величину тока туннелирования. В результате острие может углубиться в поверхность. В то же время чувствительность СТМ к электронной структуре может быть огромным преимуществом. Более традиционные спектроскопические методы, такие как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия или инверсная фотоэмиссионная спектроскопия, детектируют и усредняют данные, исходящие с относительно большой площади размерами от нескольких микрон до нескольких миллиметров в поперечнике. СТМ, наоборот, может получать спектры с площадей, сравнимых по размерам с отдельными

атомами.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ), или сканирующая силовая микроскопия (ССМ), была изобретена в 1986 г. Биннигом, Кватом и Гербером [4]. Как и любая сканирующая микроскопия, АСМ использует датчик большой резкости, перемещающийся по поверхности образца в растровой разверстке.

Атомно-силовые микроскопы (АСМ) появились как развитие СТМ-технологии, однако заложенные в них совершенно иные принципы позволяют исследовать поверхности любых материалов – проводящих, полупроводников, а также изоляторов, т. е. непроводящих электрический ток [9]. АСМ зондируют поверхность образца острой иглой длиной 1–2 мкм и диаметром обычно не более 10 нм. Игла устанавливается на свободном конце измерительной консоли.

Основной принцип работы АСМ заключается в воздействии сил со стороны поверхности образца на острие сканирующей иглы. Силы, которые чаще всего ассоциируются с АСМ, – это межатомные силы, называемые также вандерваальсовыми.

Магнитно-силовой микроскоп (МСМ) отображает пространственные вариации магнитных сил на поверхности образца [7]. Особенностью конструкции МСМ является то, что острие сканирующей иглы покрывается тонкой ферромагнитной пленкой. МСМ работает в бесконтактном режиме и детектирует изменения в резонансной частоте измерительной консоли, обусловленные изменениями магнитного поля в зазоре между острием сканирующей иглы и образцом. МСМ может визуализировать естественно встречающиеся и свободно записанные доменные структуры в магнитных материалах.

Изображения, полученные с помощью МСМ, содержат информацию как о топографии, так и о магнитных свойствах поверхности. Какая информация преобладает на изображении, зависит от величины расстояния между острием и поверхностью, потому что межатомная магнитная сила

существует при больших зазорах, чем это наблюдается для вандерваальсовой силы. Если острие находится близко к поверхности ( $< 10$  нм), то в режиме работы стандартного бесконтактного АСМ на изображении будет отражена преимущественно топография. При увеличении зазора между острием и образцом (примерно до 30–300 нм) влияние топографии снижается и становятся видны магнитные эффекты. Анализируя ряд изображений, полученных при различной высоте острия над поверхностью, можно успешно отделить магнитные эффекты от влияния топографии. Подобное поведение характерно также и для электростатических сил.

В электростатическом силовом микроскопе (ЭСМ) напряжение прикладывается между острием и образцом, в то время как измерительная консоль движется над поверхностью, не касаясь ее. Консоль отклоняется, когда попадает на статически заряженные области. Величина этого отклонения пропорциональна плотности заряда и может быть измерена стандартной системой. ЭСМ применяется для исследования распределения поверхностной плотности носителей заряда.

С помощью сканирующей термальной микроскопии (СТерМ) визуализируются локальные вариации теплофизических параметров поверхностей. Данная методика реализуется за счет использования терморезистивного зонда, работающего в одном из двух режимов – постоянного тока или постоянной температуры [8].

В первом случае электрическое сопротивление термочувствительного зонда изменяется вместе с изменением температуры в данной точке сканирования. Это регистрируется путем измерения падения напряжения при пропускании через зонд слабого постоянного тока, исключая, однако, его нагрев. При такой схеме работы картографируются температурные поля на сканируемой поверхности.

В режиме постоянной температуры отслеживается тепловой поток от зонда к образцу при поддержании постоянной температуры зонда, что позволяет визуализировать локальные изменения теплопроводности

поверхности образца. Набор данных составляется из значений напряжения, прикладываемого к зонду для его обогрева и изменяющегося в каждой точке сканирования в зависимости от теплопроводности материала образца.

Близкопольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ) является особой разновидностью сканирующей зондовой технологии, в которой используется видимый свет [7]. Другое название этой методики – сканирующая световая микроскопия. Традиционно разрешение оптических микроскопов ограничено длиной волны света – примерно половиной микрона. БСОМ улучшает разрешение оптического микроскопа на порядок.

Зондом в БСОМ является «световая воронка», которой сканируют образец. Видимый свет исходит из узкого конца световой воронки диаметром 10–30 нм и попадает на детектор либо после отражения от образца, либо пройдя сквозь него. Интенсивность оптического сигнала регистрируется детектором в каждой точке измерений, а набор данных, считанных со всей сканируемой поверхности, составляет БСОМ-образ. С помощью БСОМ можно формировать изображение поверхности в видимом свете с разрешением около 15 нм при условии, что расстояние между источником света и образцом очень мало,  $\sim 5$  нм.

БСОМ должен поддерживать расстояние между острием сканирующей иглы и образцом постоянным, чтобы получить простое оптическое изображение поверхности. Для этого могут быть использованы традиционные для АСМ методики поддержания постоянного отклонения измерительной консоли.

Имея в виду возможность элементного распознавания атомов, необходимо отметить, что в настоящее время никакая технология СЗМ не может позволить определить тип атома или молекулы при отсутствии другой информации. Тем не менее с помощью СЗМ можно проводить ограниченную идентификацию материалов, используя для этих целей данные об электронной структуре, различия в фрикционных свойствах, в притягивающем вандерваальсовом взаимодействии.

Спектроскопия – один из основных методов исследования наночастиц. Применяют различные методы спектроскопии, в том числе Оже-спектроскопию, фотоэлектронную рентгеновскую спектроскопию, Раман-спектроскопию, фотолюминисцентную и электролюминисцентную спектроскопию, дифракцию медленных электронов и др.

Метод спектроскопии Оже основан на эффекте, открытом в 1925 г. французским физиком Пьером Оже в инертных газах [3]. Суть этого явления в том, что если на одном из внутренних уровней энергии атома по каким-то причинам создается вакансия – дырка, то она быстро заполняется другим электроном атома, а выделяющаяся при этом лишняя энергия передается еще одному электрону, который и «выстреливается» из атома (Оже-электрон). Энергия этих электронов определяется природой испускающих их атомов, а число электронов пропорционально количеству таких атомов. Поэтому Оже-спектроскопия позволяет проводить одновременно качественный и количественный анализ исследуемого вещества. Ожеэлектроны имеют энергию, которой едва хватает для прохождения нескольких ангстрем твердого вещества. Следовательно, они несут информацию именно о приповерхностных слоях кристалла.

Первичную вакансию в поверхностных атомах можно создать электронным, фотонным и ионным пучками. Соответственно различают электронную, фотонную и ионную Оже-спектроскопию поверхности: ЭОС, ФОС и ИОС, первая из которых получила наибольшее распространение. Достигнутая сейчас чувствительность этого метода позволяет регистрировать, например, адсорбированные на поверхности атомы в количествах, не превышающих доли процента от общего числа поверхностных атомов.

Дифракция медленных электронов основана на фундаментальном свойстве материи – волновом характере движения частиц. Этот метод служит аналогом рентгеноструктурного анализа, применяемого для исследования кристаллической структуры в объеме вещества.

При дифракции на кристалле электроны малых энергий способны проникать лишь в поверхностные слои, и поэтому дифракция таких электронов на регулярно расположенных атомах предоставляет сведения о структуре поверхности. Это помогает использовать дифракцию медленных электронов как чувствительный метод наблюдения поверхностных структурных превращений.

В последнее время все большую популярность приобретают комбинированные методы исследования поверхности. Например, электронная Оже-спектроскопия образца производится практически одновременно с рассеянием на нем медленных электронов, а также ионов, атомов и рентгеновских лучей. Поэтому вакуумная камера, в которую помещается образец, обычно имеет множество вводов и позволяет использовать сразу несколько зондирующих агентов. Разумеется, такой всеобъемлющий анализ поверхности был бы невозможен без современных методов автоматизации эксперимента.

Фотоэлектронная рентгеновская спектроскопия (ФРС) была разработана в середине 1960-х К. Сигбаном и его помощниками. Ему была присуждена Нобелевская премия в области физики в 1981 г. за это изобретение. ФРС – это поверхностный чувствительный метод, который требует присутствия среды со сверхвысоким вакуумом [3]. Рентгеновские лучи используются для выбивания электронов атома из внутренней оболочки, и излучаемые электроны анализируются в соответствии с их кинетическими энергиями. В настоящее время метод является наиболее широко распространенным для поверхностного анализа. Он предоставляет информацию об атомном составе поверхности всех элементов, за исключением водорода и гелия. ФРС поэтому является ключевым методом исследований наноструктурированных материалов, в которых наноэффекты связаны с поверхностной активностью.

ФРС – это самый широко распространенный поверхностный чувствительный метод. Он дает информацию об атомной концентрации и

химической среде видов на поверхности. Метод очень полезен в нанотехнологии, поскольку уменьшение размеров повышает важность поверхности. Тонкие пленки могут быть исследованы при помощи ФРС с высокой точностью [9].

Раман-спектроскопия основана на неупругом рассеянии фотонов. В оптическом волокне большая часть фотонов рассеивается упруго, это называется рэлеевским рассеянием. Однако небольшая часть фотонов подвергается неупругому рассеянию. Процесс, который ведет к такому неупругому рассеянию, называется эффектом Рамана. Рассеяние Рамана может произойти с изменением вибрационной энергии молекулы. Другими словами, это может вызвать создание или аннигиляцию фотона. Популяция фотонов в возбужденном состоянии является функцией температуры. Поэтому существует интенсивность сдвига Рамана, которая происходит вследствие разности возникающих и аннигилирующих фотонов. Повторяемость события Рамана происходит приблизительно через  $10^{-14}$  с или меньше [5].

Фотолюминесцентная спектроскопия – мощный инструмент, который используется для исследования полупроводников, особенно тех, которые применяются для оптоэлектронных устройств. Это простой, гибкий, бесконтактный, неразрушающий метод зондирования электронных структур материалов.

Оборудование для ФЛ состоит из трех основных частей: светового источника для обеспечения возбуждения, дьюара для поддержания низкой температуры образцов во время оптического доступа к поверхности образца и системы обнаружения и регистрации для сбора и анализа фотонов, которые излучаются образцом.

Фотолюминесцентная спектроскопия – широко используемый, неdestructивный метод исследования полупроводниковых материалов [9]. Благодаря большой площади поверхности по отношению к объемной доле в наночастицах также предлагается способ для лучшего изучения

поверхностей наноструктур. Более того, наблюдение фиолетового смещения в положении полос показывает практичность его использования при изучении квантовых ограничений электронов в низкоразмерных системах.

Электролюминесцентная спектроскопия. Ее идея была предложена в 1969 г. Г. Дестриау, обнаружившим люминофоры, такие как сульфид цинка, плакированный медью или марганцем, светящийся при воздействии поля высокого напряжения (обычно 10 кВ/см) [3].

Хотя анализ светового излучения из нанокристаллов или объемной среды в основном проводится на основе фотолюминесцентных экспериментов, большинство светоизлучающих приборов зависят от электролюминесцентных свойств веществ. Электролюминесценция может отличаться от фотолюминесценции процессом электризации. В то время как при исследовании фотолюминесценции создание и рекомбинация диаэлектронных вакансий происходит посредством оптического намагничивания вещества, при измерении электролюминесценции электрическая энергия облучает носители. Электролюминесцентная спектроскопия является полезным и важным средством электронного исследования электронных устройств в нанометровом диапазоне. Это позволяет исследователям понять механизмы светоизлучения в приборах, основанных на нанокристаллах.

Таким образом, при измерениях различными методами регистрация параметров нанобъекта, его исследование осуществляется непосредственно сразу после изготовления, причем транспорт объекта из технологической камеры в измерительную осуществляется с помощью специального робота в сверхвысоком вакууме. Это позволяет, например, в течение нескольких часов исследовать свойства поверхности, свободной от газового монослоя.



## Заключение

В настоящее время существует целый ряд методов получения информации о структуре вещества в нанометровом диапазоне измерений. Среди них сканирующая зондовая и электронная микроскопия, различные виды спектроскопии, рентгеноструктурный анализ, ядерный магнитный резонанс и другие.

Каждый метод имеет свои характеристики и отличительные черты, тем самым является уникальным.

Можно сделать вывод, что уровнем проникновения наноструктур в жизнь человека, определяется ее качество. В связи с этим, первостепенное значение приобретают технологии создания наноструктур различного типа, их развитие и совершенствование. Фундаментальные и прикладные исследования в области нанотехнологий должны привести к революционным изменениям в материаловедении и производстве, наноэлектронике, медицине и здравоохранении, энергетике, биотехнологиях, информационных технологиях и национальной безопасности.

## Список использованных источников

1. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика: пер. с англ. / Д. Бейли, Э Райт. – М.: Кудиц-пресс, 2008. – 320 с.
2. Гапоненко С.В. Оптика наноструктур. Под ред. А.В. Федорова / С.В, Гапоненко. - СПб.:Недра, 2005 г. – 326 с.
3. Классен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К.Б. КЛассен – М.: Постмаркет, 2000. – 344 с.
4. Облант Ж.М. Метрология: проблема наномасштаба / Ж.М. Облант // Мир стандартов. – 2007. – № 5(16).
5. Пихтин А. Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин – М.: Высшая школа, 2001.– 573 с.
6. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учеб. Пособие / О.К. Скляров – СПб.: Лань, 2010. – 272 с.
7. Федоров А.В. Специальные методы измерения физических величин. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2014. – 127 с.
8. Холодков И. В. Схемотехника: учебное пособие: в 2 ч. / И. В. Холодков – ИГХТУ: Иваново. – 2013. – 152 с.
9. Цаплин А.И., Лихачев М.Е. Методы измерений в волоконной оптике: учеб. Пособие / А.И. Цаплин, М.Е. Лихачев – Пермь: ПНИПУ, 2011. – 227 с.