

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по образованию в области приборостроения  
и оптотехники в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Оптехника»  
и оптическим специальностям*



Москва • Логос • 2012

УДК 535.317.2  
ББК 22.34  
О-62

Авторы:

А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов, Г.Г. Ишанин,  
В.К. Кирилловский, В.Т. Прокопенко,  
К.А. Томский, А.Б. Шерешев

Рецензенты:

*С.Н. Бездиктько*, заместитель директора по науке  
Дома оптики ВНЦ «Государственный оптический  
институт им. С.И. Вавилова»

*А.И. Потапов*, заведующий кафедрой приборов контроля  
и систем экологической безопасности Северо-Западного  
государственного заочного технического университета

**Оптические измерения** / А.Н. Андреев, Е.В. Гаврилов,  
О-62 Г.Г. Ишанин и др.: Учеб. пособие. — М.: Университетская  
книга; Логос, 2012. — 416 с.  
**ISBN 978-5-98704-173-2**

Описываются методы и средства оптических измерений, теория точности оптических измерений, способы определения порогов чувствительности и характеристик точности методов и аппаратуры. На основе этих знаний вырабатывается умение анализировать существующие функциональные схемы оптических контрольно-измерительных устройств, определять требования к их оптическим и метрологическим характеристикам, создавать схемы и методики оптических измерений согласно возникающим задачам.

Учебное пособие написано в соответствии с программой учебной дисциплины «Оптические измерения».

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Оптехника» и оптическим специальностям подготовки бакалавров и магистров.

УДК 535.317.2  
ББК 22.34

ISBN 978-5-98704-173-2

© Коллектив авторов, 2005  
© Университетская книга, 2006, 2012  
© Логос, 2007, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
<b>1. Точность оптических измерений .....</b>	<b>8</b>
1.1. Соотношение между метрологией и наукой о технических измерениях .....	8
1.2. Оптические методы измерений. Классификация оптических измерений .....	11
1.3. Средства измерений. Эталоны. Образцовые и рабочие средства измерений .....	20
1.4. Погрешности оптических измерений. Типы измерений .....	22
1.5. Источники погрешностей при оптическом измерении .....	23
1.6. Виды погрешностей .....	30
1.7. Свойства случайных погрешностей. Функция распределения погрешностей измерения .....	32
1.8. Способы обработки результатов измерения .....	35
1.9. Погрешности косвенных измерений .....	38
1.10. Характеристики метода измерения. Метрологические характеристики .....	42
1.11. Свойства глаза .....	44
1.12. Свойства оптических контрольно-измерительных приборов .....	47
Список литературы .....	50
<b>2. Основы теории чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения .....</b>	<b>51</b>
2.1. Этапы создания оптической системы .....	51
2.2. Этапы оптического измерения .....	52
2.3. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований .....	54
2.4. Оптико-измерительные изображения первого рода .....	57
2.5. Оптико-измерительные изображения второго рода .....	63
2.6. Чувствительность и точность оптических методов измерения. Оптические измерительные наводки .....	71
2.7. Чувствительность наводок .....	86
Список литературы .....	98
<b>3. Функциональная схема прибора оптических измерений .....</b>	<b>99</b>
3.1. Прибор для оптических измерений .....	99
3.2. Типовые узлы приборов оптических измерений .....	103
3.3. Функционально-модульная идеология построения комплекса оптических измерений .....	119
Список литературы .....	127
<b>4. Измерение параметров оптических сред, элементов и систем в сборе .....</b>	<b>128</b>
4.1. Измерение показателя преломления .....	128
4.2. Измерение параметров оптических деталей .....	136
4.3. Измерение параметров и характеристик оптических систем .....	153
Список литературы .....	194

<b>5. Фотометрические измерения .....</b>	<b>195</b>
5.1. Волновые и квантовые свойства электромагнитного излучения .....	196
5.2. Шкала электромагнитных волн и перспективы использования излучения оптического диапазона спектра .....	200
5.3. Фотометрические величины и единицы их измерения .....	202
5.4. Энергетические фотометрические величины и единицы их измерения .....	203
5.5. Световые фотометрические величины и единицы их измерения ....	213
5.6. Основные законы теплового излучения нагретых тел. Прохождение излучения через оптические среды .....	225
5.7. Прохождение оптического излучения через оптические системы ...	230
5.8. Энергетическая (радиационная), яркостная, цветовая температуры и связь их с истинной температурой тела .....	235
5.9. Источники излучения .....	242
5.10. Рабочие средства измерения оптического излучения .....	257
Список литературы .....	294
<b>6. Основы радиометрии лазерного излучения .....</b>	<b>295</b>
6.1. Особенности использования оптики лазерного излучения .....	295
6.2. Основные параметры и характеристики лазерного излучения .....	300
6.3. Измерение энергетических параметров и характеристик .....	301
6.4. Измерение когерентности .....	318
6.5. Измерение поляризации .....	330
6.6. Измерение длины волны и частоты излучения лазеров .....	351
6.7. Измерение временных характеристик излучения лазеров .....	358
6.8. Измерение пространственных характеристик излучения лазеров ...	367
6.9. Измерение оптических размеров твердых тел .....	380
6.10. Измерение оптических размеров жидких тел .....	388
6.11. Лазерные методы и средства измерения неоптических (механических) величин .....	391
Список литературы .....	415

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Улучшение качества промышленной продукции — надежный путь удовлетворения потребностей народного хозяйства, ускорения научно-технического прогресса. В связи с этим постоянно возрастают требования к соблюдению метрологических правил и норм, направленных на повышение точности, надежности и производительности измерений. От точности и своевременности измерительной информации зависит правильность принимаемых решений. От качества измерений зависят современные технологии и научные исследования, учет и экономия материальных ресурсов, техническая, экологическая и медицинская диагностика, крупные научные открытия.

В современных условиях в большинстве практических применений оптимальность измерений определяется предельно достижимой точностью при минимальных затратах. Уровень точности определяется критерием целесообразности: неоправданное превышение необходимой точности обычно резко удорожает измерения, недостаточная точность приводит к браку в производстве, ошибочным результатам и решениям.

Прогресс отраслей промышленности и развитие науки требует непрерывного повышения точности измерений физических величин. Для обеспечения единства этих измерений должны непрерывно совершенствоваться эталоны единиц и создаваться все более точная измерительная аппаратура, используемая в качестве образцовых средств и при научных исследованиях. Поэтому для создания средств измерений высшей точности должны использоваться новейшие достижения науки.

К средствам измерений высшей точности относятся оптические и оптико-физические методы измерения и приборы. Как наиболее точные, они применяются во многих областях науки и производства — в ядерной и космической технике, лазерных технологиях, в машиностроении и приборостроении для контроля наиболее точных деталей, при сборке прецизионных узлов, для научных исследований в области физики, химии, медицины, биологии и т.д.

Оптические измерения — техническая наука, основным содержанием которой является измерение и контроль конструктивных

параметров оптических элементов и систем, а также измерение физических характеристик изучаемых объектов с помощью оптических методов и приборов. Основным достоинством оптических измерений являются высокая точность и наглядность. Точность оптических измерений соизмерима с длиной световой волны (для приборов, работающих с глазом, средней длиной волны считается  $\lambda_{\text{ср}} = 0,555$  мкм). Поэтому, например, и в машиностроении, и в приборостроении оптические измерения применяются там, где необходимы предельно высокие точности. Так, концевые меры изготавливаются и аттестуются с применением интерферометрии, причем достигаемая точность находится на уровне  $\lambda_{\text{ср}}/20$ , так что погрешность не превышает 0,03 мкм. Научные исследования, а также разработки в области высоких технологий требуют проведения измерений с наивысшими точностями, которые нередко находятся на пределе теоретически предсказанных возможностей.

Производство современных оптических приборов, отвечающих требованиям высоких технологий, должно быть обеспечено высокоточными методами и аппаратурой оптических измерений и контроля. Современное оптическое приборостроение характеризуется увеличением объемов выпуска оптической продукции, совершенствованием ее технических характеристик, а также необходимостью создания и производства новых классов приборов и систем.

К оптике нового класса могут быть отнесены, например, оптические системы космических телескопов, высококачественные объективы исследовательских микроскопов, объективы оптических приборов для технологий микроэлектроники, оптические системы устройств записи и воспроизведения информации, оптические системы для лазерных технологий. Эти группы оптических систем могут соответствовать своему назначению прежде всего при условии достижения предельно высоких оптических характеристик качества изображения, когда волновой фронт, сформированный оптической системой, не имеет отклонений свыше нескольких сотых долей длины световой волны от формы, соответствующей идеальному качеству изображения (чаще всего — сферической). При этом по концентрации энергии изображение, построенное реальной оптической системой, должно лишь на несколько процентов отличаться от идеального, предсказанного теорией дифракции.

Выполнение этих задач невозможно без совершенствования и развития методов и средств контроля и аттестации оптической продукции, применения высокоточных измерений параметров и характеристик оптических систем и их элементов. Возможностями

этих средств сейчас во многом определяется успешное развитие оптической промышленности и аппаратуры.

Успешная работа современного исследователя в оптической измерительной лаборатории зависит не только от хорошей оснащённости современными приборами, но и от знания и применения теоретических и технических аспектов современных оптических измерений, их возможностей и перспектив.

Дисциплина «Оптические измерения» относится к базисным дисциплинам образовательных программ по направлению «Оптехника». Цель изучения дисциплины — освоение обучающимися теоретических, практических и метрологических основ классических и современных оптических измерений.

Развитие классических методов оптических измерений связано с трудами крупных ученых, таких как Аббе, Гартман, Майкельсон, Физо, Фуко, Фраунгофер, Линник, Максудов, Обреимов, позже Тяжелов, Захарьевский, Афанасьев, Погарев, Пуряев и многих других. Первый учебник по курсу «Оптические измерения», выдержавший три издания, был написан В.А. Афанасьевым (1907–1970). Главное отличие настоящего издания от предшествовавших состоит в том, что оно написано в соответствии с новыми учебными программами и содержит описание как классических, так и более современных методов и аппаратуры, основанных на таких современных достижениях, как лазеры, голография, компьютеры, современные источники и приемники оптического излучения.

---