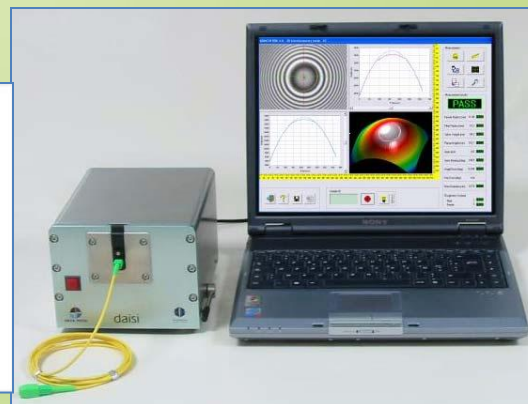


Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



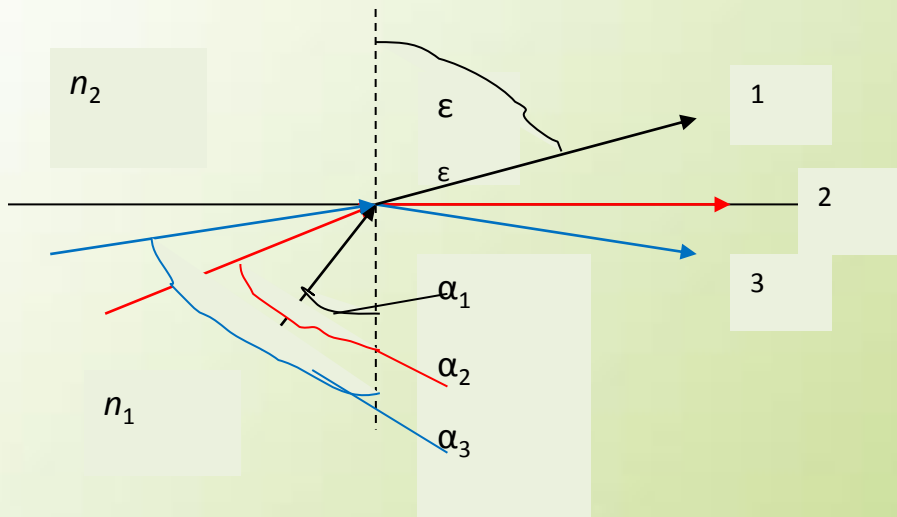
1. Коэффициент преломления.
2. Физические принципы действия рефрактометров и интерферометров.
3. Технические рефрактометры. Применение рефрактометрии.
4. Интерферометрия как метод локального сравнения амплитудно-фазовых распределений оптических полей.
5. Локализация интерференционной картины.
6. Многолучевая интерферометрия.
7. Интерференция частично когерентного света, Фурье-спектроскопия.
8. Резонансные фильтры пространственных частот.
9. Доплеровские измерения в оптике



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Рефрактометрия (от лат. *refractus* — преломленный и др.-греч. μετρέω «измеряю») – метод исследования веществ, основанный на определении показателя (коэффициента) преломления (рефракции) и некоторых его функций

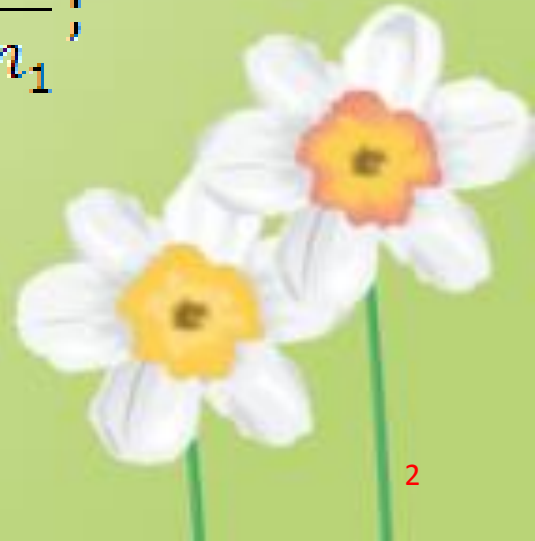


$$n = \frac{c}{v}; \quad n_{\text{отн}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1};$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \epsilon} = \frac{n_2}{n_1};$$

$$n_1 > n_2$$

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Зависимость показателя преломления жидкости:

- от состава

$n = n_1V_1 + n_2V_2;$
n, n_1, n_2 – соответственно показатели преломления смеси и компонентов;
V_1 и V_2 – объемные доли компонентов
$(V_1 + V_2 = 1)$

- от давления

$dn/dP, \cdot 10^{-5} \text{ атм}^{-1}$	
Вода	1,48
Спирт	3,95
Бензол	4,80

- от температуры

$dn/dt, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	
Большинство жидкостей	$-(0,0004 \div 0,0006)$
Вода	-0,0001
Глицерин	-0,0002
Гликоль	-0,00026

$$n_t = n_0 + at + bt^2 + \dots$$

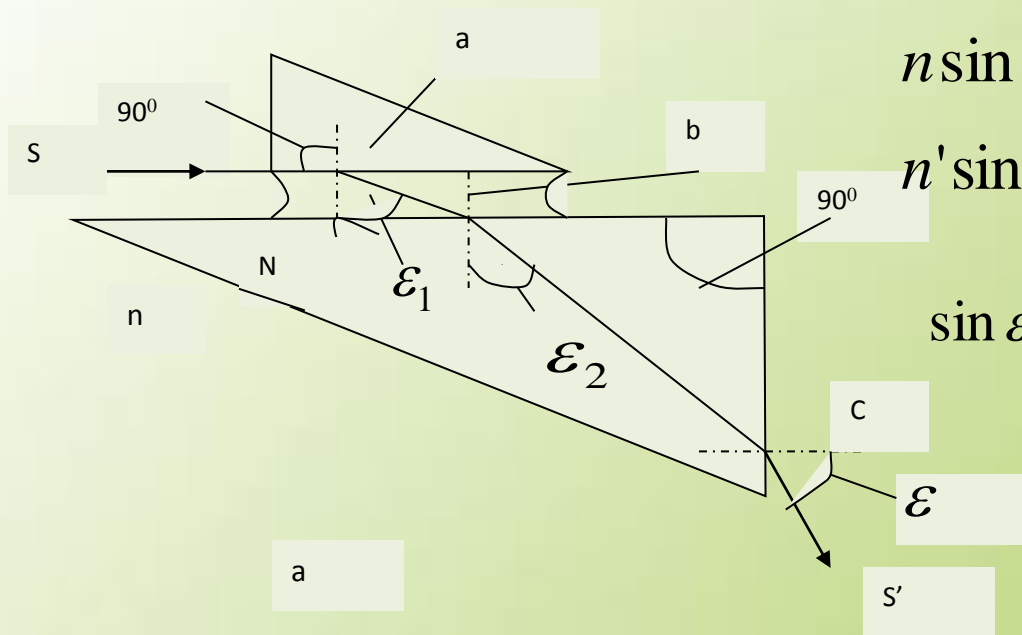
При Δt не более (10 – 20) $^\circ\text{C}$

$$n_t = n_0 + at$$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Рефрактометрические методы основаны на использовании явления полного внутреннего отражения, возникающего, если свет распространяется из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, при этом углы падения должны быть равными или большими угла полного внутреннего отражения.



$$n \sin 90^\circ = n' \sin \epsilon_1$$

$$n' \sin \epsilon_1 = N \sin \epsilon_2 \quad \rightarrow n = N \sin \epsilon_2$$

$$\sin \epsilon_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \epsilon / N^2} = \frac{n}{N}$$

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 \epsilon}$$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Формулы для вычисления показателя преломления

Преломляющий угол призмы	Формула для расчета n
$\Theta = 90^\circ \pm 3''$	$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon}$
$\Theta > 90^\circ$	$n = \sin \Theta \sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon} - \sin \varepsilon \cos \Theta$
$\Theta < 90^\circ$	$n = \sin \Theta \sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon} + \sin \varepsilon \cos \Theta$

Определение показателя преломления стекла может быть произведено с точностью до 0,0001, если преломляющий угол θ эталонной призмы предварительно измерен на гониометре с погрешностью не более $\pm 2''$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Определение дисперсии стекла и ошибки определения n

$$n = \sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon}$$

$$dn = -\frac{\sin 2\varepsilon}{2\sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon}} d\varepsilon + \frac{N}{\sqrt{N^2 - \sin^2 \varepsilon}} dN$$

$$dn = -\frac{\sin 2\varepsilon}{2n} d\varepsilon + \frac{N}{n} dN$$

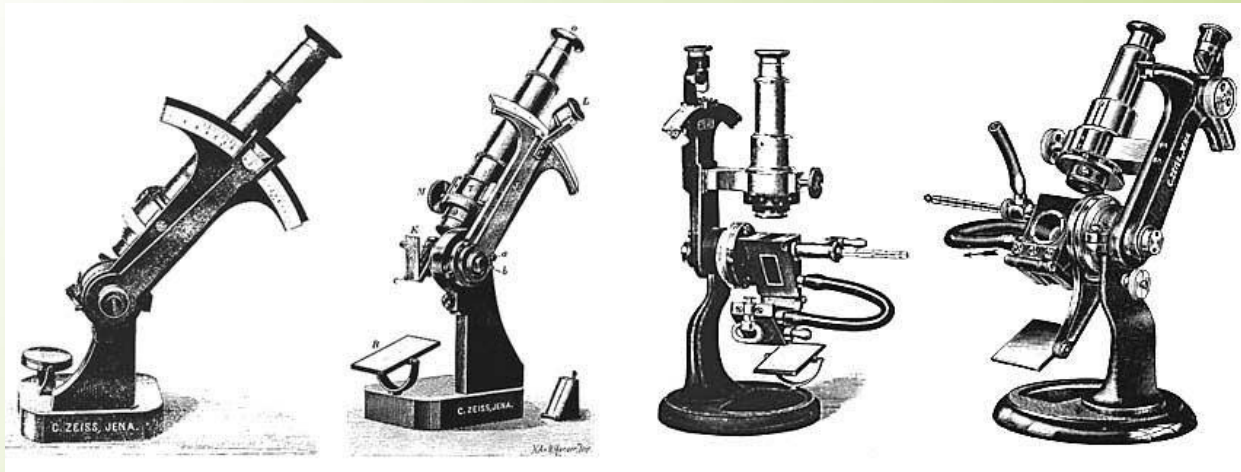
$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sin^2 2\varepsilon}{4n^2} \sigma_\varepsilon^2 + \left(\frac{N}{n}\right)^2 \sigma_N^2}$$

где $d\varepsilon$ - приращение угла ε
 dN - дисперсия стекла призмы прибора
для выбранной линии
спектра;
 σ_ε и σ_N - ошибки измерения ε и
 N соответственно

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Рефрактометр Аббе



Оптические измерения

- **Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия**

Рефрактометр Аббе состоит из двух стеклянных прямоугольных призм – измерительной призмы с высоким показателем преломления ($n = 1,7$ для жёлтой линии натрия $\lambda = 589$ нм), с полированной гипотенузной гранью и вспомогательной откидной призмы с матированной гипотенузной гранью, зрительной трубы, отсчётной шкалы, специального компенсатора. В поле зрения трубы наблюдается резкая линия раздела светлого и тёмного полей, соответствующая предельному углу.

Состав иммерсионной жидкости	Показатель преломления стекла
Смесь глицерина с водой	1,33 ... 1,47
Смесь бензина с керосином	1,35 ... 1,45
Смесь альфа-монобромнафталина с керосином	1,45 ... 1,65
Смесь альфа-монобромнафталина с йодистым метиленом	1,65 ... 1,74
Раствор серы в йодистом метиле	1,74 ... 1,78



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Оптическая схема рефрактометра ИРФ-22: 1 — осветительное зеркало; 2 — вспомогательная откидная призма; 3 — основная измерительная призма; 4 — матированная грань откидной призмы; 5 — исследуемая жидкость; 6 — призмы Амичи компенсатора; 7 — объектив зрительной трубы; 8 — поворотная призма; 9 — окуляр зрительной трубы.



Для рефрактометра ИРФ-22 пределы измерения в проходящем свете $1,3 \div 1,7$, в отражённом - $1,3 \div 1,57$; точность измерения $\pm 0,0002$.

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

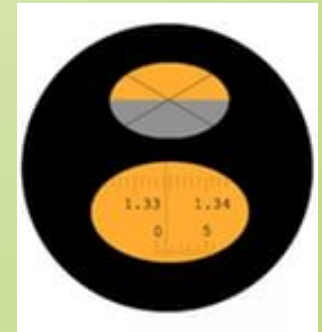
Современные модели рефрактометра Аббе



Бинокулярный рефрактометр



Лабораторные рефрактометры

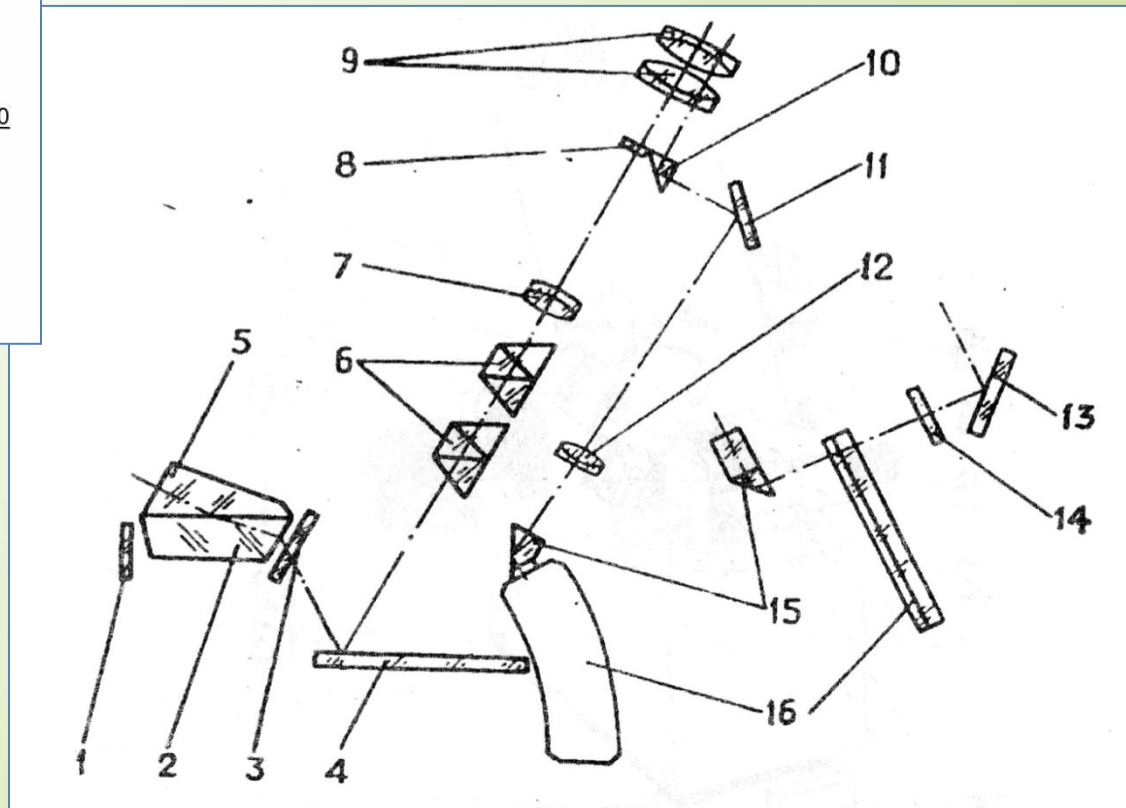
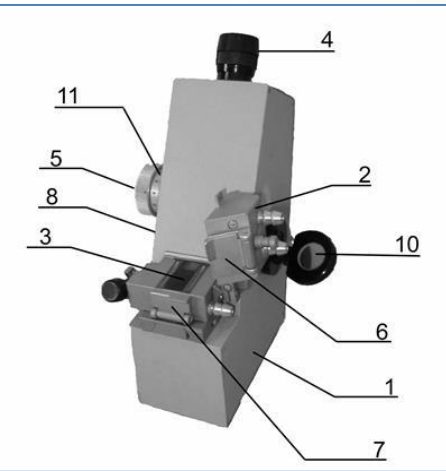


Поле зрения и шкала



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



**Внешний вид рефрактометров ИРФ -454 и ИРФ-454 Б2М
и оптическая схема рефрактометра ИРФ-454 Б2М**

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Рефрактометр типа Пульфриха

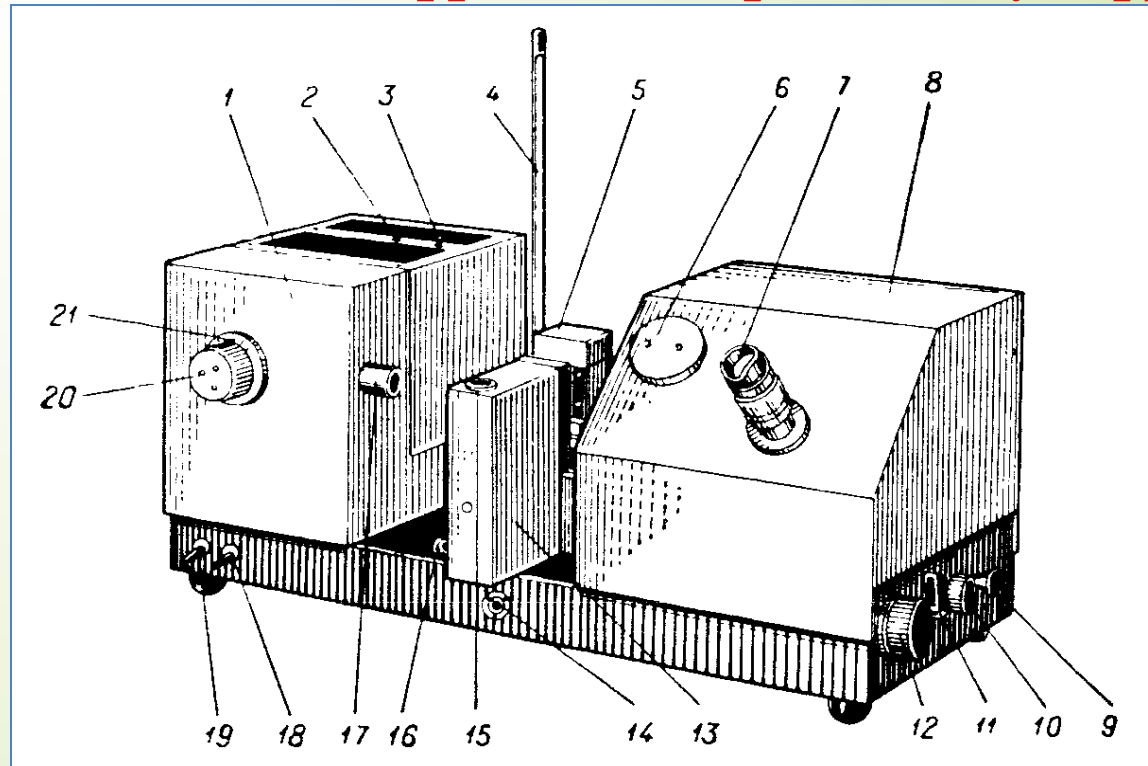
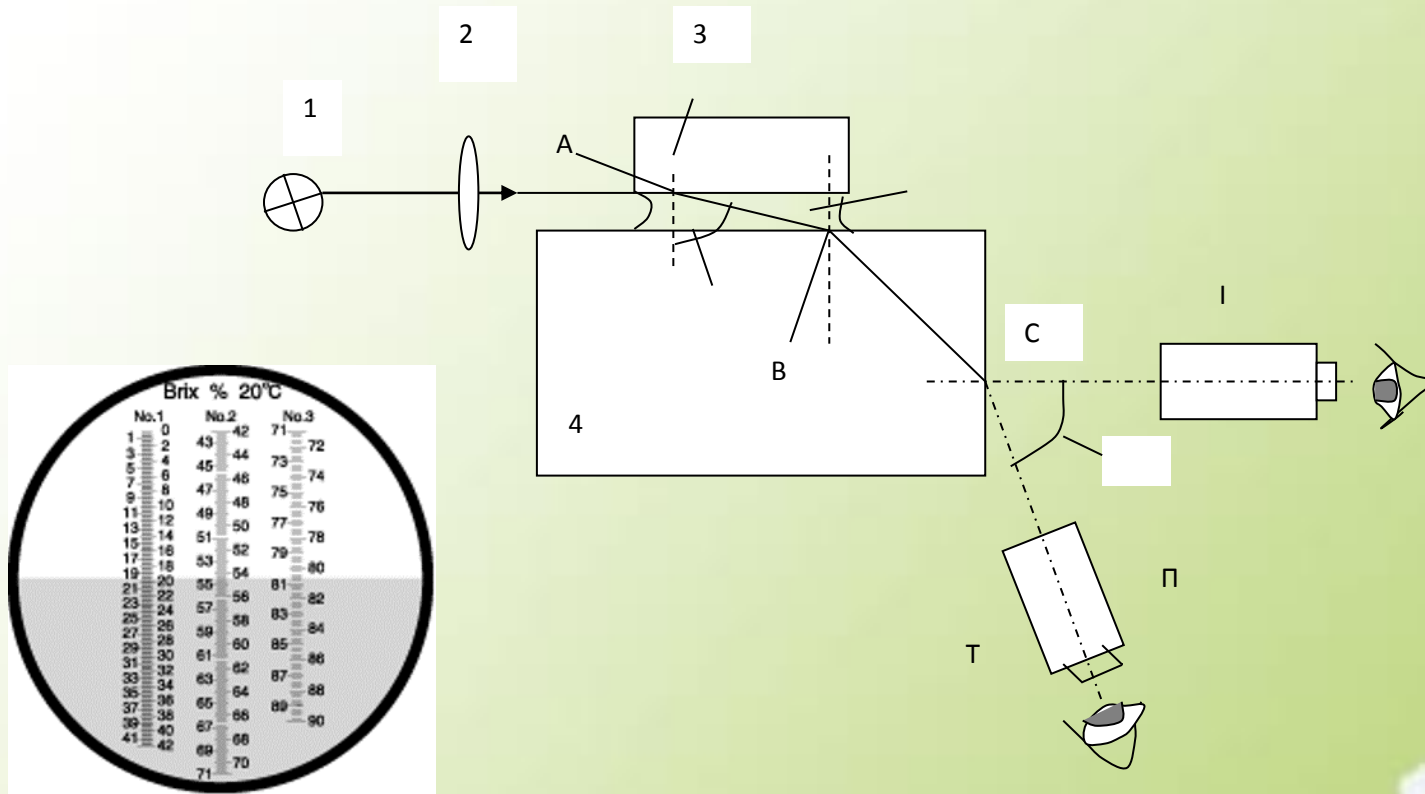


Рис. VIII, 13. Рефрактометр Пульфриха PR-2:

1—осветитель; 2, 3—юстировочные винты для H_2 и He-ламп; 4—термометр; 5—измерительная призма; 6—крышка; 7—окуляр; 8—корпус измерительного устройства; 9—выключатель для автоколлимации; 10—рукоятка шкалы для точной установки; 11—переключатель для отсчета в зрительной трубе и по лимбу; 12—маховичок наводки зрительной трубы; 13—коллиматор; 14, 15—юстировочные винты для измерительной призмы и коллиматора соответственно; 16—кнопка включения гейслеровых трубок; 17—выходной объектив осветителя со светофильтром; 18—выключатель ртутной лампы; 19—главный выключатель; 20—переключатель для смены ламп; 21—рукоятка смены светофильтров.

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



1 – источник света; 2 – конденсор;
3 – исследуемый образец; 4 – эталонная призма
Принципиальная схема рефрактометра Пульфриха

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Требования к полировке граней призмы и подготовке образца

Параметр	ИРФ-23	ИРФ-24, ИРФ-25
Погрешность прямого угла между полированными гранями	$\pm 6'$	$\pm 10'$
Погрешность полировки, интерференционных полос $b = \lambda / 2n_{ж}$ / см: - взаимно перпендикулярных граней; - боковой грани, встречающейся со скользящим лучом	2 5	2 5
Погрешность из-за клиновидности слоя жидкости (γ – угол клина)	$\Delta n \approx n_{ж} \left(1 - \frac{n_0^2}{2n_{ж}^2} \right) \gamma$	
Длина рабочей грани образца, мм, не менее при $\lambda = 0,6$ мкм, $n_{ж} = 1,6$ и $\gamma = 3'' = 1,5 \cdot 10^{-5}$ рад	15	15
Образец – прямоугольный параллелепипед (или - для ИРФ-23- прямоугольная призма) размером, мм, не менее	3x3x3	10x10x10
Стекло образца	Без видимых глазом свилей и крупных пузырей	

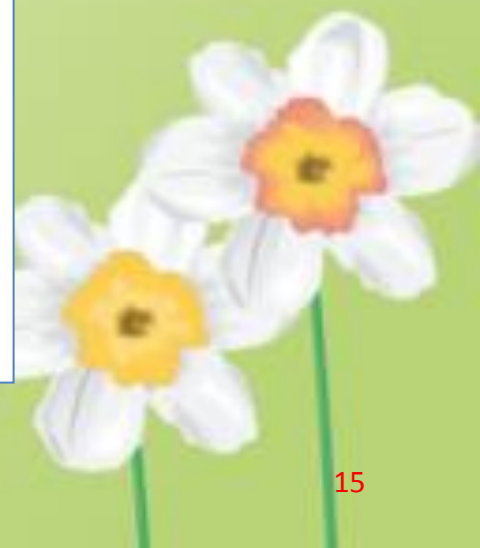
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Таблица точек поверки шкалы при определении основной погрешности рефрактометра по показателю преломления и сходимости показаний

Модель рефрактометра	Диапазон измерения	Поверяемая точка шкалы	Примечание
Модель А – рефрактометрический блок 1	1,2-2,0	1,25	
	1,2-1,7	(1,33) 1,47 1,65	
– рефрактометрический блок 2	1,6-2,0	1,65 1,75	
	1,6-2,0	1,94	
Модель Б	1,2-1,7	1,25	
		(1,33)	
		1,47 1,65	

Поверяемые точки ИРФ-454



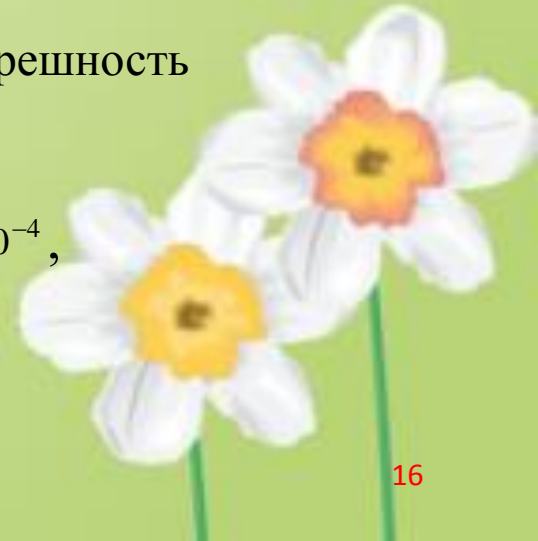
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Точность измерения показателя преломления оптического стекла на рефрактометре ИРФ-23 зависит от следующих факторов:

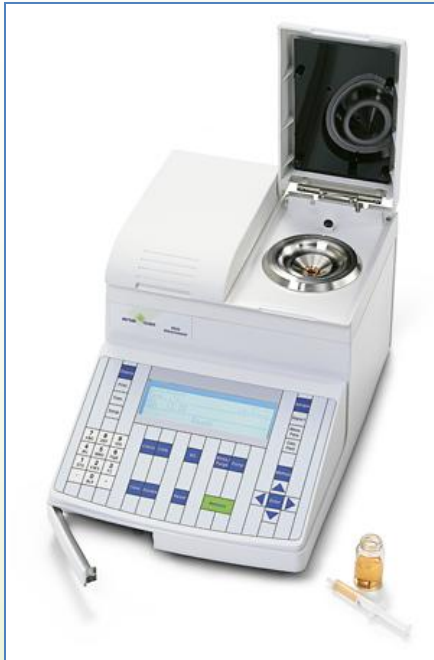
- точности измерения предельного угла; при $d\varepsilon = 0,5$ погрешность $\Delta n = \pm 5 \cdot 10^{-5}$;
- неплоскостности поверхности образца, соприкасающейся с эталонной призмой; при неплоскостности равной $2b$ погрешность $\Delta n = \pm 2 \cdot 10^{-5}$;
- точности измерения показателя преломления эталонной призмы; при $\Delta N = \pm 2 \cdot 10^{-5}$ погрешность $\Delta n \sim \pm 2 \cdot 10^{-5}$;
- отклонения преломляющего угла эталонной призмы от 90° ;
при $\Delta\theta = 3$ погрешность $\Delta n = \pm 1 \cdot 10^{-5}$;
- отклонения температуры от 20°C ; при $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ погрешность $\Delta n = \pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Суммарная точность определения n равна $\pm 0,8 \cdot 10^{-4}$,
дисперсии - $\pm 3 \cdot 10^{-5}$



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Рефрактометры RE40D и RE50

Источник света – фотодиод, $\lambda_{\text{max}} = 589,3 \text{ нм}$

Приемник излучения – фотоэлемент

Обработка и индикация сигнала - микропроцессор



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

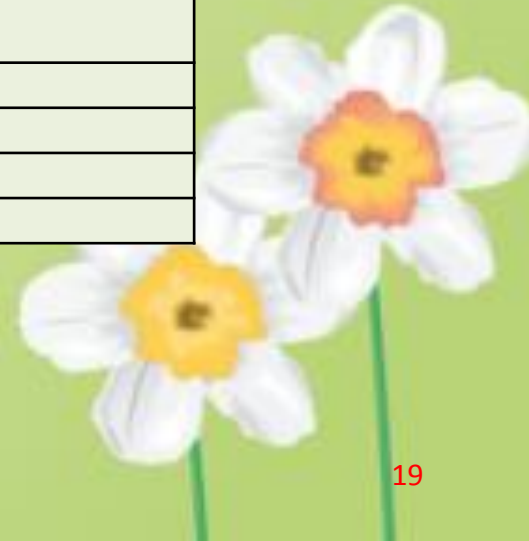
Наименование характеристики	Значение характеристики	
	RE40D	RE50
Рабочая длина волны, нм	589,3	
Диапазон измерений: - показателя преломления, n_D ; - массовой концентрации сахарозы, % _{масс} (Brix)	1,32 ... 1,70	1,32 ... 1,58
Дискретность показаний: - показателя преломления, n_D ; - массовой концентрации сахарозы, % _{масс} (Brix)	0,0001 0,1	0,00001 0,01
Пределы допускаемой абсолютной погрешности: - показателя преломления, n_D в диапазоне - от 1,32 до 1,40 включительно - свыше 1,40 - массовой концентрации сахарозы, % _{масс} (Brix)	$\pm 1 \cdot 10^{-4}$ $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ $\pm 0,1$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$ $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ $\pm 0,03$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

СКО результата измерений при пяти независимых наблюдениях, не более		
- показателя преломления, n_D ;	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
- массовой концентрации сахарозы, % _{масс} (Brix)	0,1	0,01
Диапазон термостатирования, °С	15 ... 70	15 ... 50
Среднее время одного измерения, с	15	
Время непрерывной работы, ч, не менее	8	
Условия эксплуатации:		
- диапазон температуры окружающей среды, °С	5 ... 35	
- диапазон относительной влажности воздуха, %	45 ... 85	
- диапазон атмосферного давления, кПа	90,6 ... 104,8	
Напряжение питающей сети, В	220^{+22}_{-33}	
Частота питающей сети, Гц	50 ± 1	
Потребляемая мощность, ВА, не более	20	



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Габаритные размеры рефрактометров, мм:	
- длина	270
- ширина	400
- высота	225
Масса, кг, не более	9
Наработка на отказ, ч, не менее	2000
Средний срок службы, лет	8

Поверка рефрактометров RE40D и RE50 производится в соответствии с документом МП 242-0740-2008 «Рефрактометры мод. RE40Б и RE50. Методика поверки», утверждённым ГЦИ СИ «ВНИИМ имени Д.И. Менделеева» 05.08.2008.

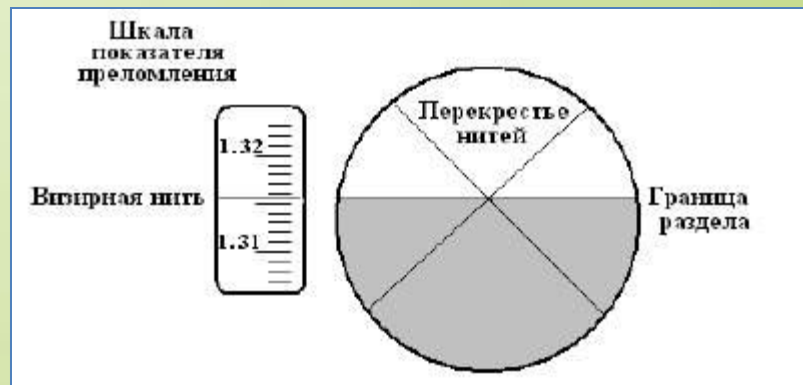
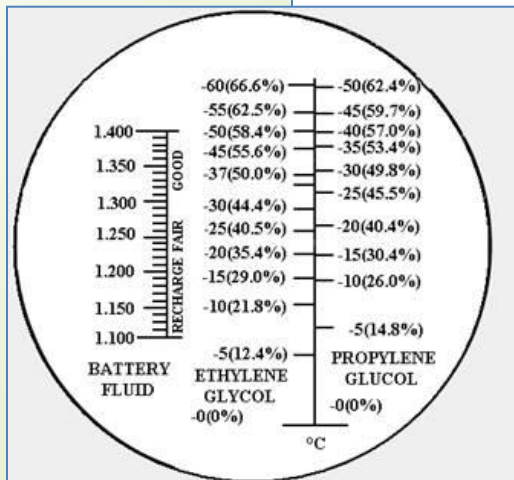
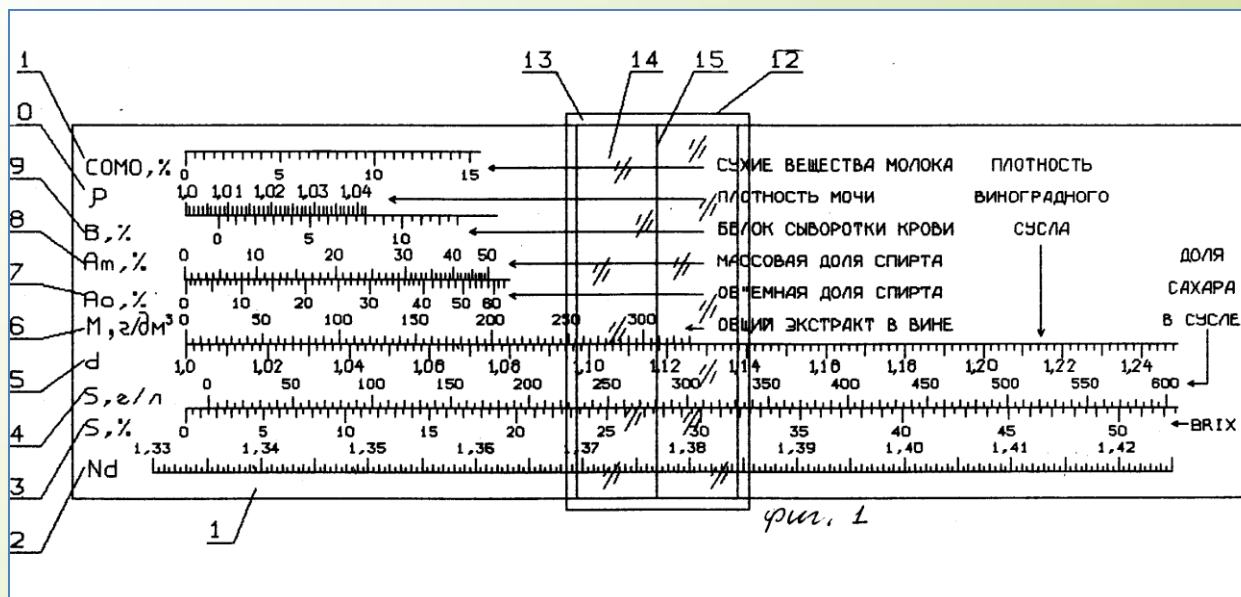
Межповерочный интервал - 1 год



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Калибровка шкал рефрактометров



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

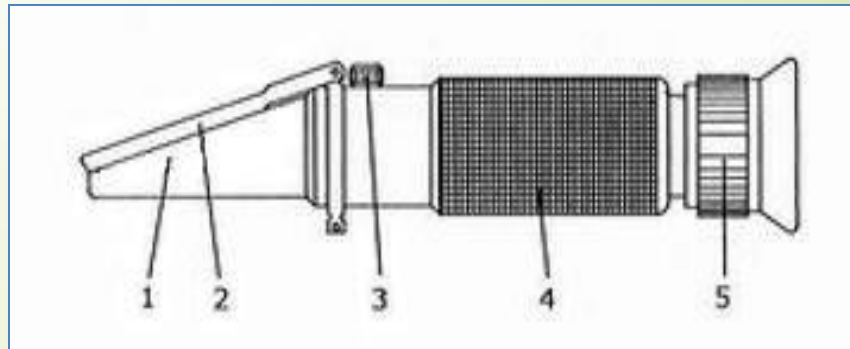


Оптическая схема рефрактометра Хеш



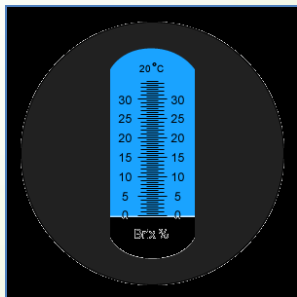
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



1 – призма; 2 – крышка; 3 – шкала; 4 – калибровочный винт;
5 – кольцо для настройки резкости; 6 – окуляр;

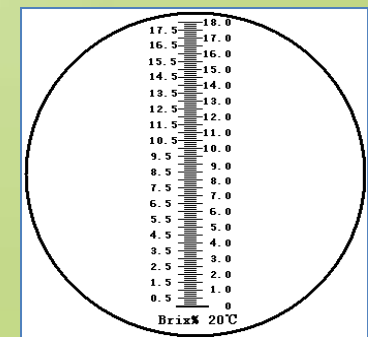
Схема ручного рефрактометра



Рефрактометр для определения содержания сахара в фруктах



Ручной рефрактометр для определения влажности мёда



Рефрактометр для определения плотности сахаров в растворе

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Рефрактометры для офтальмологии - кераторефрактометры



Рефрактометр Rudolph Research
для фармацевтических измерений



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



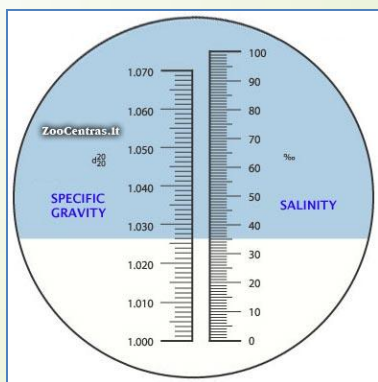
Рефрактометр для быстрой проверки плотности антифриза и температуры замерзания



Автоматический рефрактометр



Производственный рефрактометр



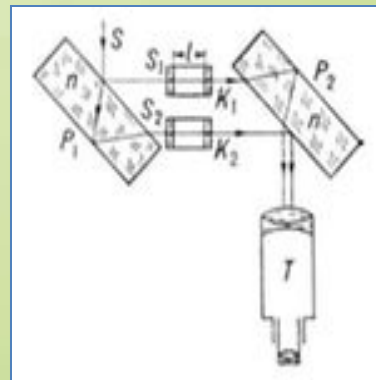
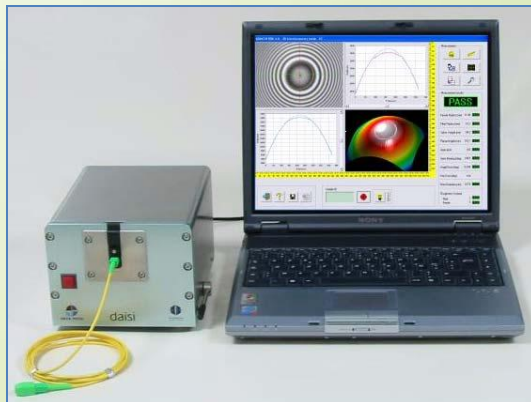
Рефрактометры цифровые

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Интерференционные приборы - интерферометры

применяются для высокоточного измерения перемещений деталей, их линейных и угловых размеров, контроля формы и микрогеометрии поверхностей, исследования неоднородностей в прозрачных объектах, исследования качества оптических систем, измерения показателей преломления жидкостей и газов, контроля тонкослойных покрытий, анализа спектрального состава излучения и т.п.



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением волн по амплитуде

Интерференционная картина локализована в бесконечности

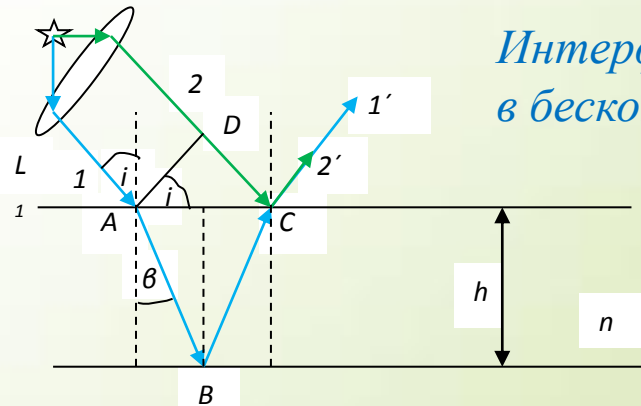


Рисунок 1 – Интерференция в тонкой плёнке при освещении её плоской волной

Располагая на пути лучей 1 и 2 собирающую линзу, картину можно спроецировать на экран. Каждая интерференционная полоса соответствует лучам, падающим на экран под одинаковым углом. *Полосы равного наклона*

При наблюдении	Усиление света (максимум)	Ослабление света (минимум)
в отраженном свете	$2hn \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda; m = 0, 1, 2, \dots$	$2hn \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}; m = 0, 1, 2, \dots$
в проходящем свете	$2hn \cos \beta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}; m = 0, 1, 2, \dots$	$2hn \cos \beta = 2m \frac{\lambda}{2} = m\lambda; m = 0, 1, 2, \dots$

В формулах: h – толщина пластинки, n – показатель преломления материала, из которого изготовлена пластинка, β – угол преломления луча в пластинке, m – порядок интерференции, λ – длина волны излучения

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением волн по амплитуде

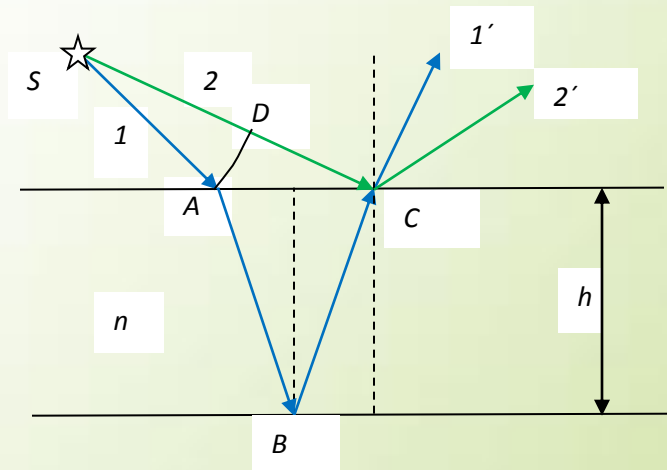


Рисунок 2 – Ход лучей при образовании полос равного наклона при освещении пластинки расходящимся пучком

Интерференционная картина имеет вид концентрических светлых и темных колец, центры которых совпадают с основанием перпендикуляра, опущенного из источника на верхнюю грань пластинки, на которой картина и локализована.

Полосы равной толщины



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением волн по амплитуде

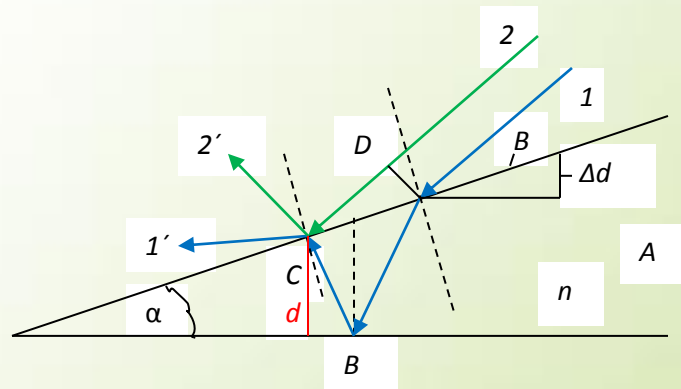


Рисунок 3 – Схема образования полос равной толщины в клине

Интерференционные полосы параллельны ребру клина, **локализованы на его поверхности**, одинаковы по ширине для монохроматического света. При падении света *нормально к поверхности* клина разность хода волн, интерферирующих в точке С, равна

$$\Delta = 2dn + \lambda/2$$

где $\lambda/2$

- дополнительная разность хода, обусловленная отражением луча 2 от оптически более плотной среды. Ширина интерференционной полосы определяется из условий $2n\Delta d = \lambda$, $\alpha \approx \sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta d}{B}$ и равна

$$B = \lambda / (2n\alpha)$$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением волн по амплитуде

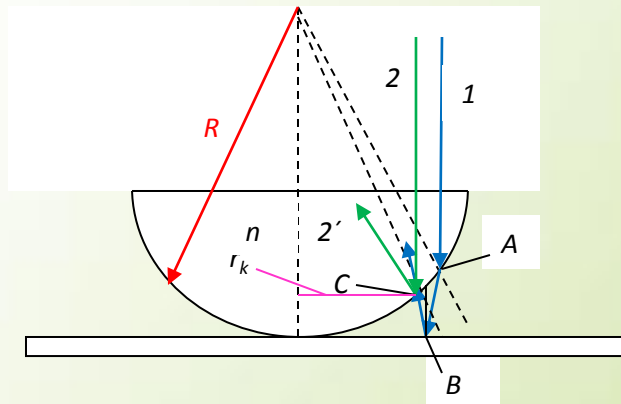


Рисунок 4 – Схема образования колец Ньютона

Кольца Ньютона составляют систему concentric тёмных и светлых колец, сгущающихся в направлении от центра к краю интерференционной картины.

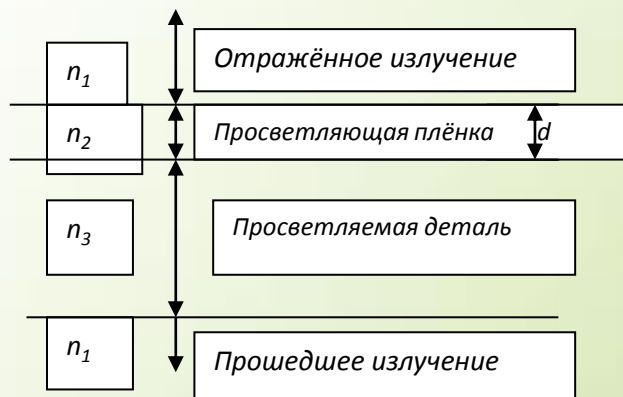
Радиусы колец Ньютона

При наблюдении	Светлые кольца максимум)	Тёмные кольца (минимум)
в отраженном свете	$r_k = \sqrt{(2k-1) \frac{\lambda R}{2}}; k = 1, 2, 3, \dots$	$r_k = \sqrt{k \lambda R}; k = 1, 2, 3, \dots$
в проходящем свете	$r_k = \sqrt{k \lambda R}; k = 1, 2, 3, \dots$	$r_k = \sqrt{(2k-1) \frac{\lambda R}{2}}; k = 1, 2, 3, \dots$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением волн по амплитуде



Ход лучей в условиях просветления оптической детали

Применение:

- просветление объективов и других оптических элементов;
- изготовление интерференционных светофильтров

Эффект просветления реализуется, если;

- показатель преломления плёнки удовлетворяет условию $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$;
- толщина пленки такова, что для волн, отражённых от верхней и нижней границ плёнки, выполняется условие интерференционного минимума:

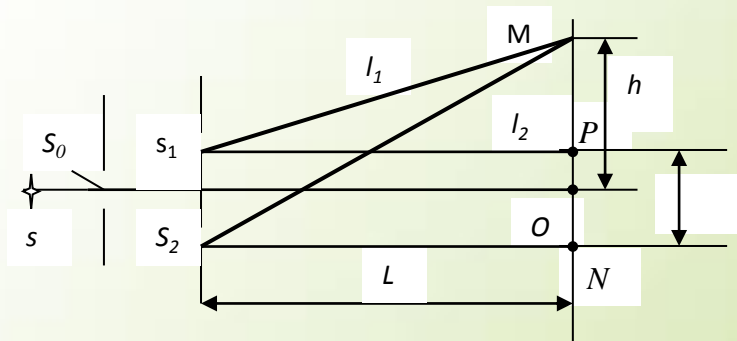
$$\Delta = 2dn_2 \pm \lambda/2$$

(Знак плюс выбирают при потере полуволны на нижней границе, знак минус – при потере $\lambda/2$ на верхней границе)

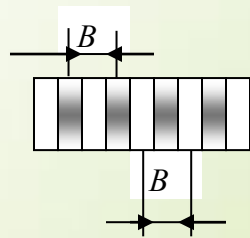
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением по волновому фронту



Опыт Юнга



Геометрическое место точек, для которых при каждом m реализуется условие $\Delta = \text{const}$, называют **интерференционной полосой**.

Расстояние B между двумя соседними максимумами (или минимумами) в интерференционной картине называют **шириной интерференционной полосы**:

$$B = h_{m+1} - h_m = \frac{\lambda L}{2l}$$

Оптическая разность хода $\Delta = \frac{2hl}{L}$

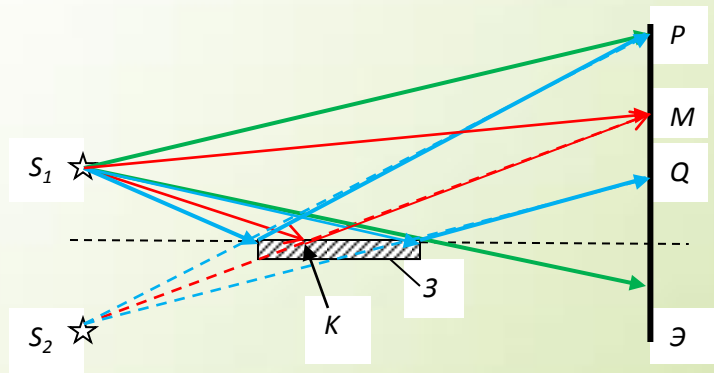
Координаты точек экрана, в которых имеют место максимумы и минимумы освещенности:

$$h_{\max} = \frac{m\lambda L}{2l} ; \quad h_{\min} = \frac{(2m+1)\lambda L}{4l}$$

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

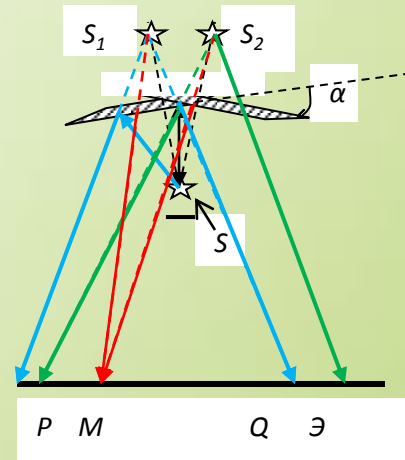
Схемы с делением по волновому фронту



Зеркало Ллойда

$$B = h_{m+1} - h_m = \frac{\lambda L}{2l}$$

$2l$ – расстояние между источниками;
 L – расстояние от плоскости расположения источников до экрана



Бизеркало Френеля

Ширина интерференционной полосы $B = \frac{(a+b)\lambda}{2b\alpha}$

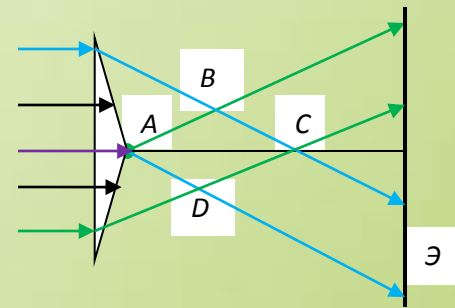
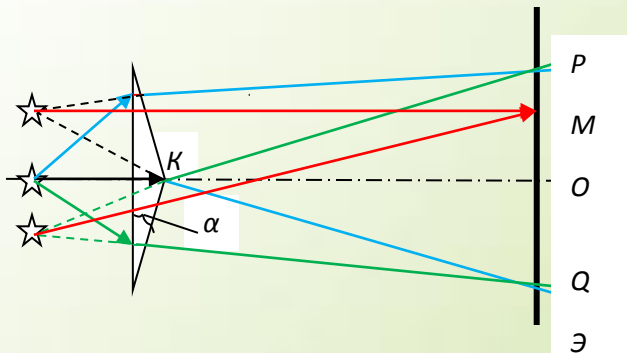
b – расстояние от источника S до точки пересечения зеркал, a – расстояние от плоскости расположения источников до экрана; α – малый угол между зеркалами

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Схемы с делением по волновому фронту

Бипризма Френеля



Освещение расходящимся пучком

Освещение параллельным пучком

$$B = \frac{(a + b)\lambda}{2b\alpha(n - 1)}$$

Ширина интерференционной полосы

$$B = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

B – расстояние от источника до вершины бипризмы K , a – расстояние от вершины бипризмы до экрана \mathcal{E} , n – показатель преломления материала бипризмы; α – малый угол при основании бипризмы

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

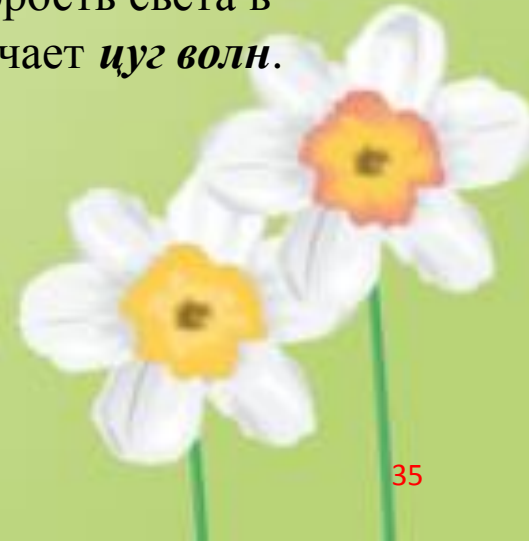
Условия пространственной когерентности:

- постоянная во времени разность фаз (условие, эквивалентное одинаковости циклических частот интерферирующих волн) $\omega_1 = \omega_2 = \omega$;
- соизмеримость амплитуд интерферирующих волн;
- одинаковое состояние поляризации (вектор напряжённости электрического поля в обеих волнах колеблется вдоль одной прямой);
- волны после прохождения разных путей «встречаются» в некоторой точке пространства.

Условие временной когерентности: оптическая разность хода волн не превышает *длины когерентности* $L_{\text{ког}} = c\tau$, где c – скорость света в вакууме, $\tau \sim 10^{-8}$ с – время, за которое атом вещества излучает *цуг волн*.

Контрастность интерференционной картины

$$K = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}$$



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Интерференционные методы применяются для:

- *прецизионного измерения расстояний;*
- *контроля качества поверхностей оптических деталей;*
- *измерения длины волны излучения;*
- *определения показателей преломления и дисперсии показателя преломления оптических сред;*
- *определения концентрации растворов;*
- *для анализа спектрального состава излучения различных источников;*
- *для астрономических измерений и др.*

Для этих целей используются **интерферометры** разных

ТИПОВ



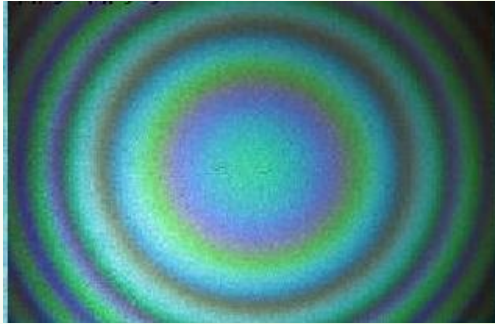
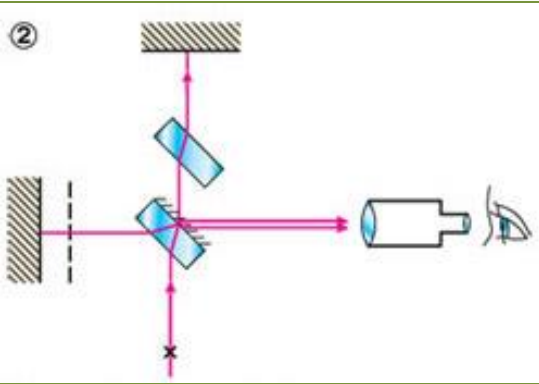
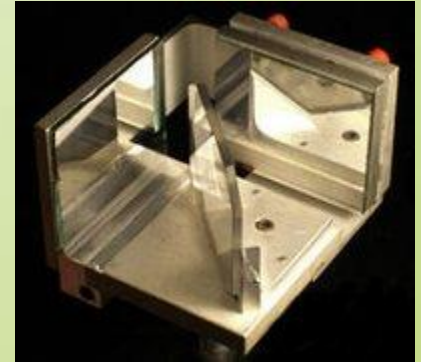
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

1907 Нобелевская премия по физике за создание прецизионных инструментов и выполненные с их помощью спектроскопические и метрологические исследования.

Интерферометр Майкельсона

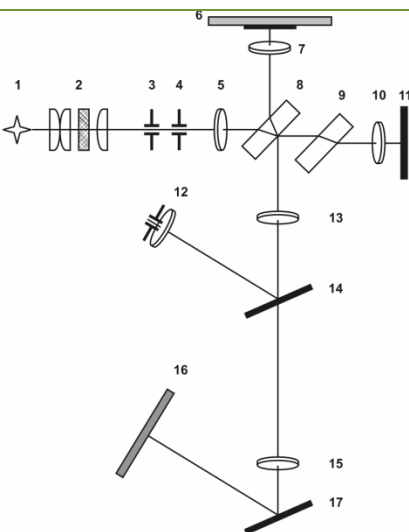
В 1890-е годы Майкельсон решил важную метрологическую задачу: провел измерение эталона метра в единицах длины волны излучения кадмия; изобрел спектральный прибор высокой разрешающей способности – «эшелон Майкельсона». В 1920 с помощью изобретенного им «звездного интерферометра» провел измерения угловых размеров звезды-гиганта Бетельгейзе. В 1929 он повторил опыт Майкельсона – Морли, добившись еще более высокой точности. Последним его исследованием, завершить которое пришлось ученикам, стало новое измерение – скорости света в вакууме.



Интерференционная картина, полученная при расположении зеркал *строго и не строго* под углом 90°

Оптические измерения

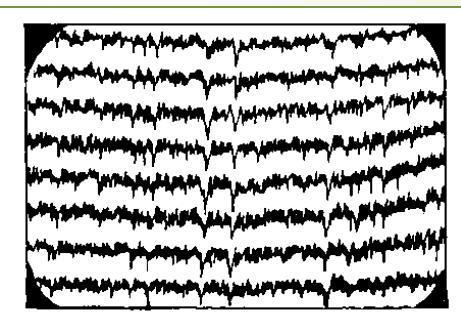
Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



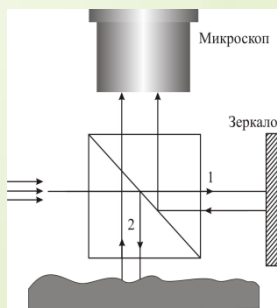
Микроинтерферометр МИИ-4М предназначен для измерения параметров шероховатости полированных и доведенных поверхностей, а также для измерения толщин пленок (высоты уступов, образованных краем пленки и подложки): $h = (a/b) \cdot \lambda/2$
а – величина искривления, b – ширина интерференционной полосы; $\Gamma = 500^x$ при визуальном наблюдении, линейное поле зрения в пространстве предметов 0,3 мм

Отличительные особенности:

- источник – светодиод белого света; высокий контраст и яркость интерференционных полос; высокая чувствительность метода и стабильность ИК;
- низкое питающее напряжение от источника переменного тока; высокий уровень электробезопасности;
- возможны измерения с помощью винтового окулярного микрометра или фотоэлектрического окулярного микрометра (ФОМ) с автоматической обработкой результатов измерений;
- в сочетании с ФОМ точность измерения шероховатости повышается в 2 раза, производительность процесса измерения – в 10 – 15 раз; снижается утомляемость оператора

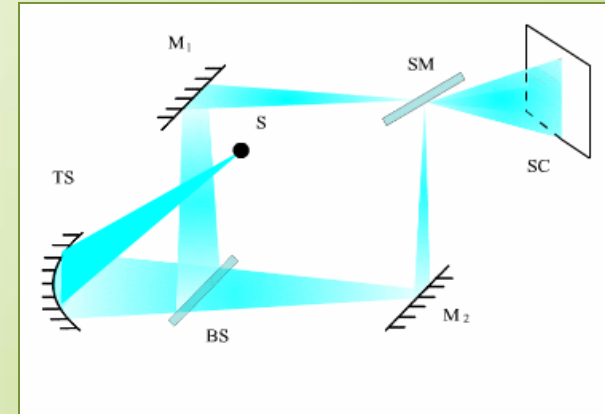
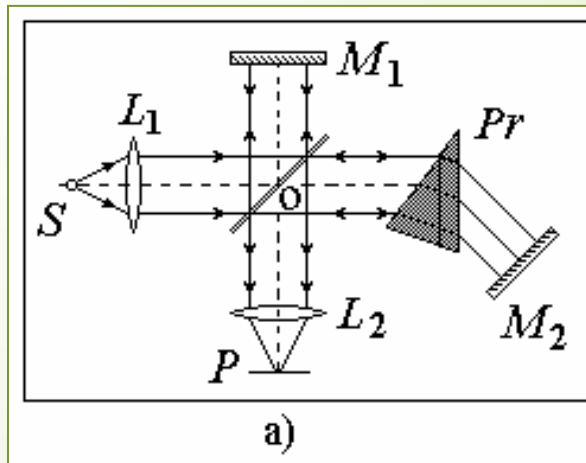


Rmax, Rz: 0,1-0,8 мкм



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Интерферометр Бейтса

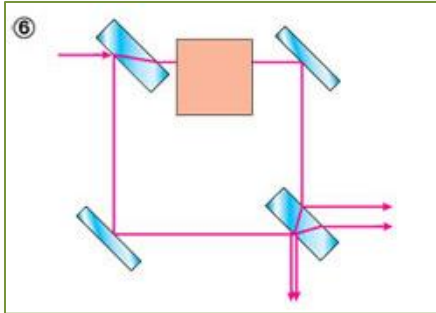
Интерферометр Тваймана-Грина собран на базе схемы интерферометра Майкельсона и служит для контроля оптических элементов. В его измерительном плече помещается оптический элемент, качество изготовления которого нужно оценить. В случае призмы второе плечо разворачивают, оставляя в нем плоский отражатель.

Для контроля линз или многолинзовых объективов зеркало M_2 делают сферическим, как в *интерферометре Бейтса* для прецизионного контроля сферичности зеркал телескопов.



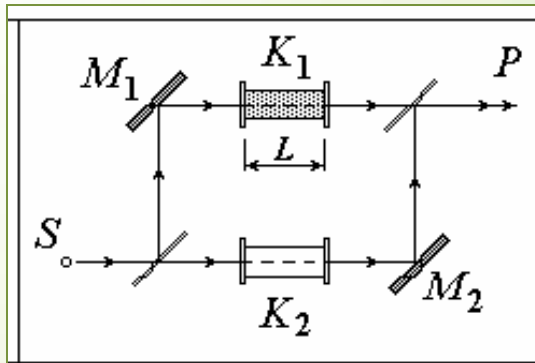
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

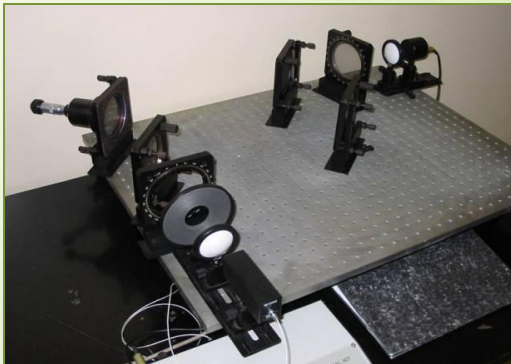


Австрийский физик Эрнст Мах, крупный исследователь процессов аэродинамики, сконструировал специальный интерферометр с широкими пучками и большим расстоянием между зеркалами для съёмки ударных волн и скачков уплотнения воздушных потоков, обтекающих различные тела. Показатель преломления воздуха в уплотнённом потоке выше, чем в невозмущённой среде. Это отражается на форме линий интерференции.

Интерферометр Маха

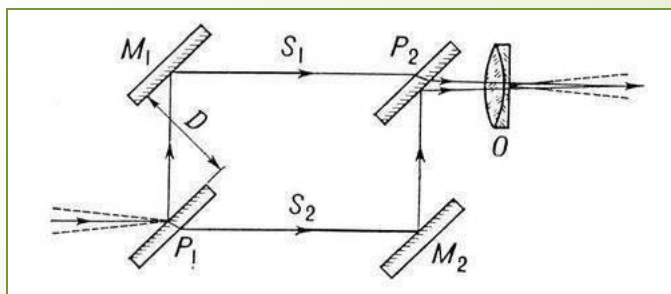
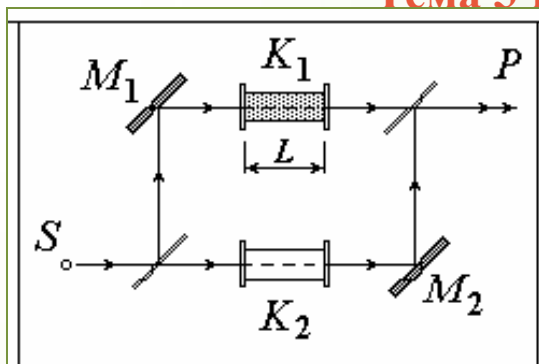


Интерферометр Маха - Цендера предназначен, в первую очередь, для измерения показателей преломления газов. При прохождении света через кюветы появляется добавочная разность хода $\Delta = (n_2 - n_1)L$, где L – длина кюветы, n_1 и n_2 – показатели преломления веществ, заполняющих кюветы. Визуально можно заметить сдвиг интерференционной картины с точностью до $1/40$ порядка, и при $L = 10$ см обнаружить изменение $n_2 - n_1$ около 10^{-7} .



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Отличие между интерферометрами Маха — Цендера и Рождественского состоит в том, что в первом из них попарно параллельно устанавливаются непрозрачные и прозрачные зеркала, а во втором - входное полупрозрачное с непрозрачным для отраженного луча и непрозрачное для прошедшего луча с выходным полупрозрачным.

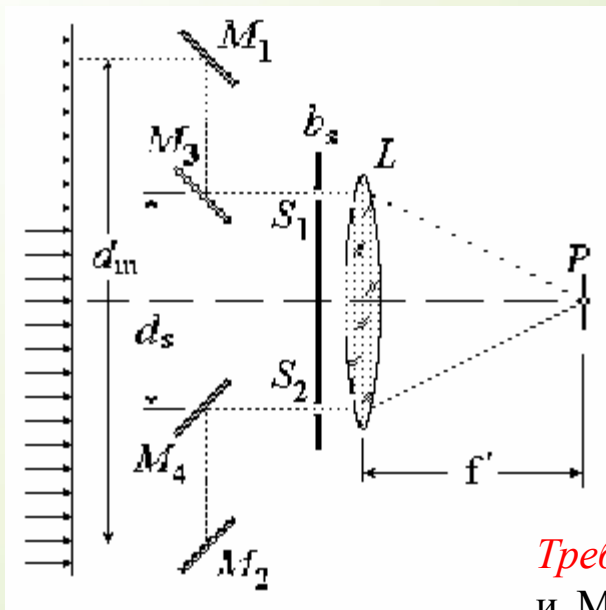
Расстояние между пучками S_1 и S_2 может быть сделано очень большим, что облегчает установку в один из них различных исследуемых объектов. Широко применяется в аэрогазодинамических исследованиях. Д.С. Рождественский использовал интерферометр в сочетании со спектрографом для исследования дисперсии света и определения дисперсии оптических материалов

Интерферометр Рождественского



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



В **звездном интерферометре Майкельсона**, собранном на базе телескопа-рефрактора, перед объективом L установлена маска с двумя щелями. Свет на эти щели направляется системой зеркал, расстояние d_m между зеркалами M_1 и M_2 может изменяться. За счет этого удается измерить корреляционную функцию для лучей, расстояние между которыми намного больше, чем диаметр объектива телескопа.

$$\text{Видность интерференционной картины} \quad V = \frac{\sin \frac{\pi d_m \varphi}{\lambda}}{\frac{\pi d_m \varphi}{\lambda}}$$

При увеличении расстояния d_m видность полос в плоскости P падает. Определяя значение $d_m = \lambda/\varphi$, при котором $V(d_m) \rightarrow 0$, оценивают угловой размер источника 2ω .

Требование к конструкции интерферометра: перемещение зеркал M_1 и M_2 с сохранением их ориентации с точностью до долей длины волны. Майкельсону удалось обеспечить d_m до 6 м, что соответствует *угловому разрешению* 0,02 угловой секунды.

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



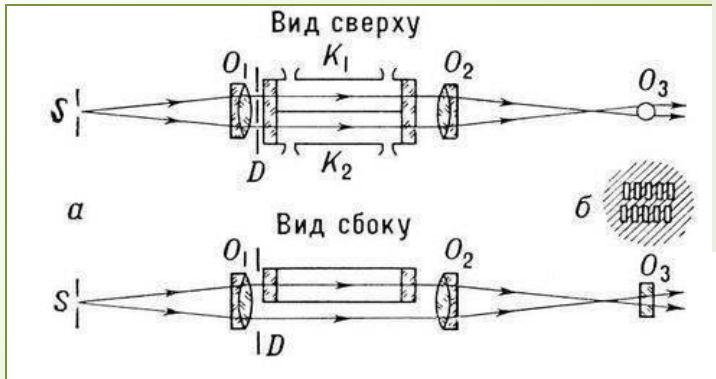
метр **я** — однопроходной двулучевой интерферометр предложен лордом Рэлеем в 1886 году.

Интерферирующие пучки выделяются с помощью двух щелевых диафрагм D . Пройдя кюветы K_1 и K_2 , эти пучки собираются в фокальной плоскости объективом O_2 , где образуется ИК полос равного наклона, которая рассматривается через окуляр O_3 . При этом часть пучков, выходящих из диафрагм, проходит ниже кювет и образует свою интерференционную картину, расположенную ниже первой. Измеряя величину смещения ИК, по числу полос Δm можно найти показатель преломления

$$n_2 = n_1 + \frac{\lambda_0}{l} \cdot \Delta m,$$

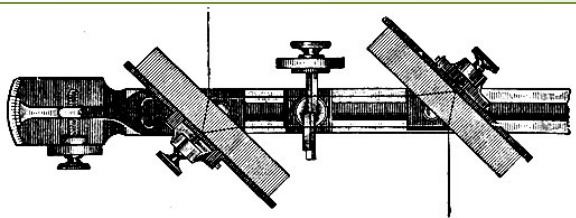
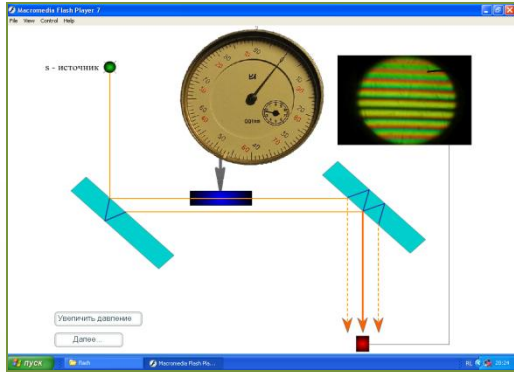
где l — длина кюветы с газом, λ_0 — длина волны излучения источника

При типичных параметрах установки — длине кювет в один метр, длине волны в 550 нм и порядке интерференции $\Delta m = 1/40$, — можно измерить разницу показателей преломления, равную 10^{-8} . Чувствительность интерферометра определяется длиной кюветы. Её максимальная длина, как правило, определяется техническими возможностями контроля за температурой, так как тепловые флуктуации обусловят изменение показателей преломления газов.



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Пучок света S после отражения от передней и задней поверхностей первой пластины P_1 разделяется на два пучка S_1 и S_2 . Пройдя через кюветы K_1 и K_2 , пучки, отразившиеся от поверхностей пластины P_2 , попадают в зрительную трубу T , где интерферируют, образуя полосы равного наклона. Если одна из кювет наполнена веществом с показателем преломления n_1 , а другая с n_2 , то по смещению интерференционной картины на m полос по сравнению со случаем, когда обе кюветы наполнены одним и тем же веществом, можно найти n_2 : $n_2 = n_1 + m \cdot \lambda / l$ (l — длина кюветы).

Интерферометр Жамена наиболее прост в юстировке и может использоваться для измерения показателей преломления жидкостей и газов. Его недостаток — близкое расположение обоих световых лучей: объектного и реперного.

Точность измерения показателей преломления с помощью интерференционных рефрактометров достигает 10^{-7} и даже 10^{-8} .

Интерферометр Жамена

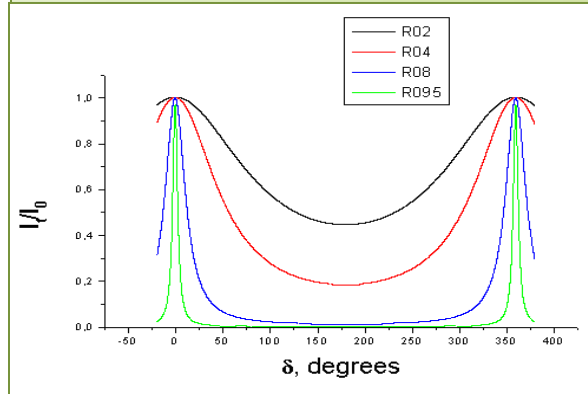
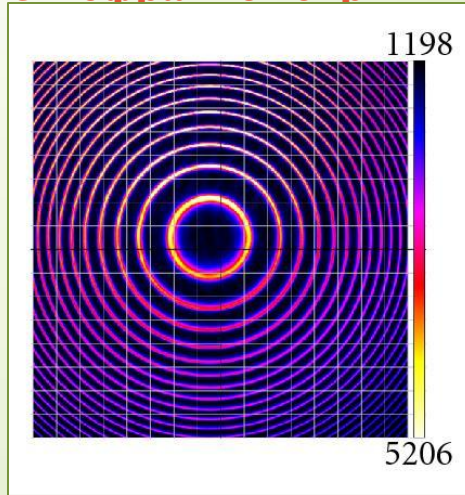
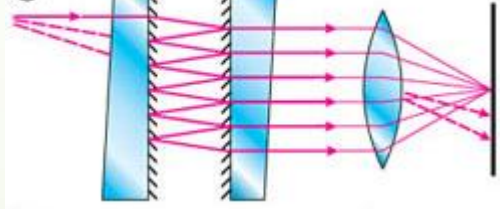
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



IT51-30
(ЛОМО)

Интерферометр Фабри - Перо



$$\frac{I_{np}}{I_{над}} = \left(\frac{E_{20}}{E_{00}} \right) \left(\frac{E_{20}}{E_{00}} \right)^* = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)} - \text{формула Эйри}$$

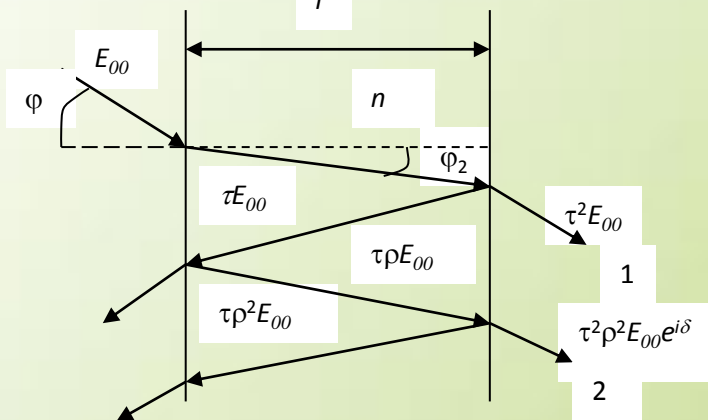
Наибольший порядок интерференции, который можно получить в интерферометре Фабри-Перо, определяется формулой $m = 2l / \lambda$;

(при $l = 5$ см и $\lambda = 500$ нм $m = 200000$).

Угол между соседними максимумами $\delta\varphi = -\frac{\lambda}{2l \sin\varphi}$

Область свободной дисперсии $\Delta\lambda = \lambda / m = \lambda^2 / (2l)$

При $l = 0,5$ см и $\lambda = 500$ нм $\Delta\lambda \approx 0,025$ нм



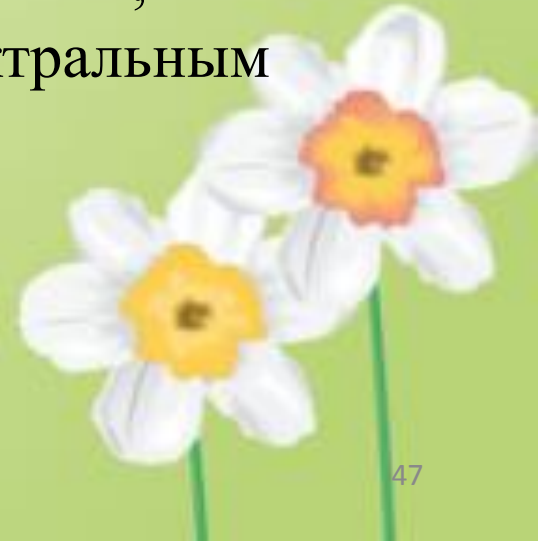
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

- Ширина исследуемой структуры и допустимое расстояние между пластинами интерферометра связаны формулой

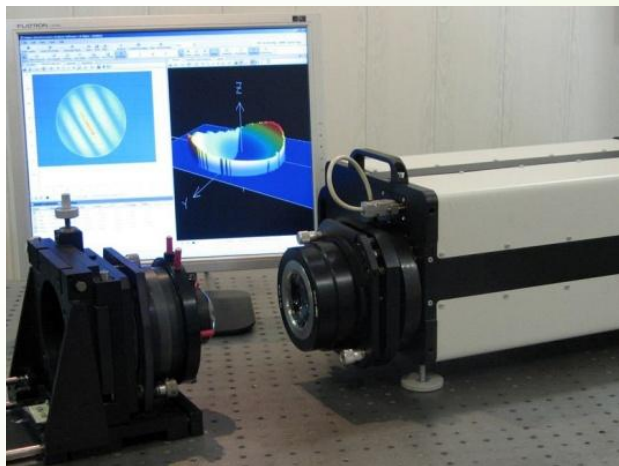
$$\Delta\lambda = \lambda / m = \lambda^2 / (2l)$$

- Определяемая в ней величина $\Delta\lambda$ – область свободной дисперсии. При $l = 0,5 \text{ см}$ и $\lambda = 500 \text{ нм}$. Это означает, что интерферометр Фабри–Перо следует использовать только для исследования контуров спектральных линий, выделенных каким-либо более грубым спектральным прибором.



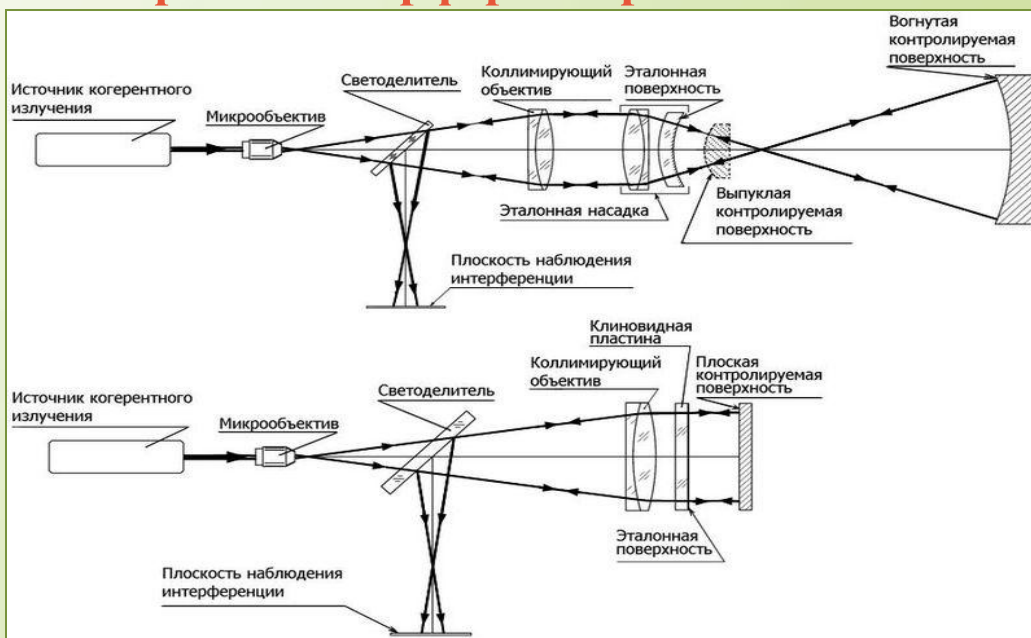
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Интерферометр с фазовым сдвигом ФТИ-100 предназначен для прецизионного контроля плоских, сферических и асферических оптических поверхностей в условиях оптического производства и в научных исследованиях.

Измерения: точность $\lambda/100$;
воспроизводимость $\lambda/1000$;
время одного измерения $<0,5$ с



Интерферометр Физо — простейший многолучевой интерферометр, применяемый главным образом для контроля точности изготовления поверхностей оптических деталей и оптических систем. Интерферометр Физо часто относят к интерферометрам с общим ходом пучков, так как до эталонной (полупрозрачной) поверхности пучки имеют общий ход.

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Шахтный интерферометр ШИ-11 применяется для контроля рудничной атмосферы при горноспасательных работах, в трубопроводах шахтных и дегазационных системах, в колодцах, промышленных котлах и резервуарах.

Технические характеристики:

Пределы измерения содержания газов в объемных долях, % 0 – 6 .

Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения, % $\pm 0,2$.

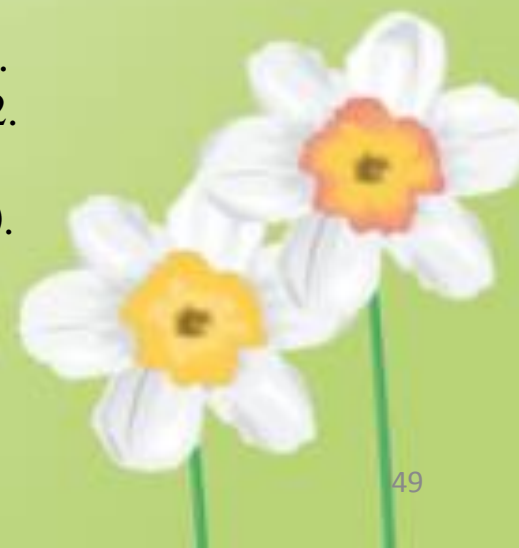
Рабочие условия эксплуатации прибора: температура окружающей среды, °С от -10 до + 40; атмосферное давление, мм рт. ст. 720 - 800.

Время одного определения, мин 0,5

Исполнение прибора: рудничное, искробезопасное . Габаритные размеры, мм 115x54x186. Масса прибора без футляра, кг 1,45

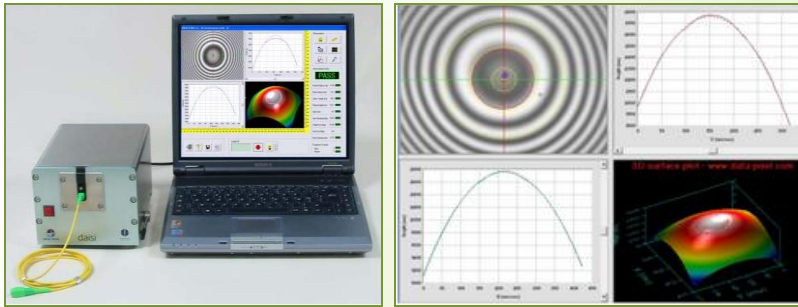


Волоконно-оптический интерферометр



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Полнофункциональные интерферометры компании Data-Pixel (DAISI, DAISI MT и 3DScore) предназначены для инспекции геометрии наконечников оптических коннекторов и применяются в лабораторных и производственных условиях. Несжатая высококачественная картинка в режиме реального времени передается с интерферометра в ПК через интерфейс USB2.0. Для снижения ошибок и повышения надежности измерений все шаги калибровки автоматизированы и встроены в дружелюбный интерфейс программного обеспечения.

DAISI MT сочетает в себе все преимущества интерферометра DAISI и применяется для измерения геометрии как *одноволоконных*, так и *многоволоконных наконечников*.

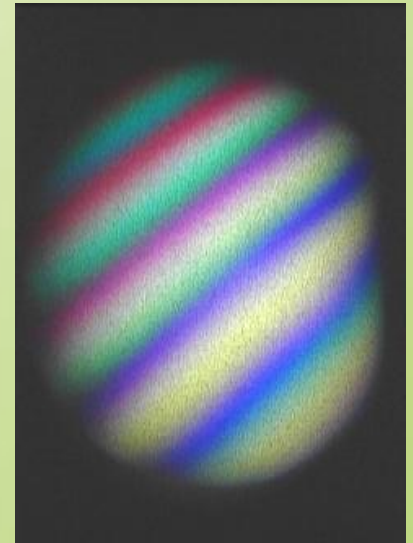
Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

Основные характеристики DAISI

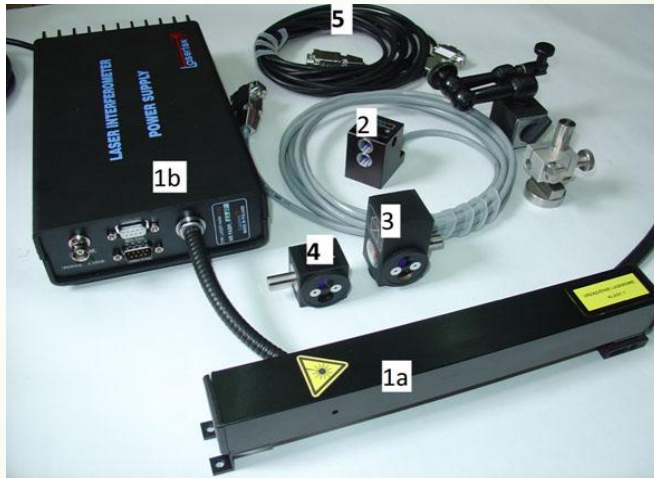
• Диапазон измерений радиуса кривизны поверхности торца, мм –	от 3 до бесконечности.
Повторяемость/ воспроизводимость* измерений -	$\pm 0.1\%$ / $\pm 0.2\%$
• Диапазон измерений смещения вершины торца наконечника относительно центра волокна, мкм - от 0 до 500.	
Повторяемость/ воспроизводимость* измерений -	± 0.5 / ± 1.0
• Диапазон измерений заглубления/возвышения волокна относительно поверхности торца наконечника, нм -	± 160
Повторяемость/ воспроизводимость* измерений -	± 1.0 / ± 1.5
• Диапазон измерений угла скола, ° - 0 до 12.	
Повторяемость/ воспроизводимость* измерений -	$\pm 0.03^\circ$
Скорость измерений, сек - 2	
Увеличение -	300^{\times}
Длина волны, нм -	633
Требования к питанию - 12V 25VA	

* - Повторяемость – погрешность в значениях 50 последовательных измерений, не отключая измеряемого коннектора от интерферометра. Воспроизводимость - погрешность в значениях 50 измерений, отключая и подключая снова один и тот же измеряемый коннектор от интерферометра.



Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



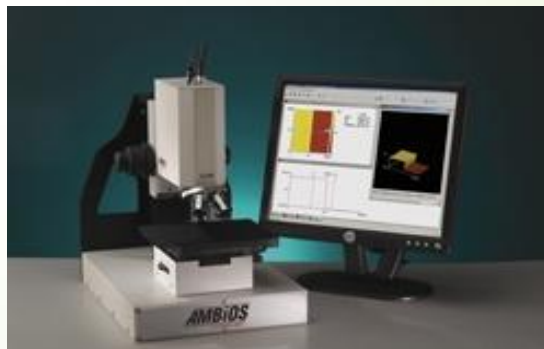
LaserScale LS10 состоит из:

- стабилизированной лазерной головки (1a) соединённой с блоком питания (1b),
- детектора (2),
- линейного интерферометра IL1 (3),
- линейного рефрактора RL1 (4),
- кабеля, используемого для подключения устройства к порту USB компьютера (5), измерительной лавки с шаговым двигателем

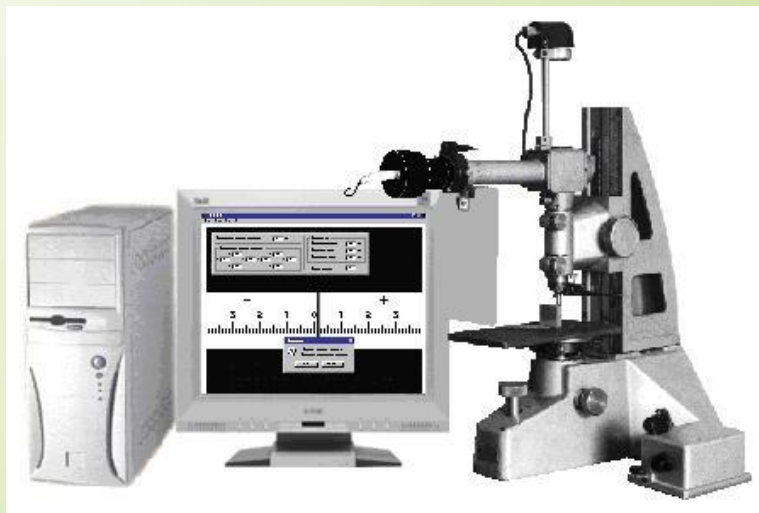
Лазерный интерферометр LaserScale LS10 предназначен для применения в системах управления машинами вместо обычных магнитных измерителей. Применяя лазерный интерферометр удается существенно увеличить точность работы ЧПУ или другой промышленной машины. Возможности лазерного интерферометра LaserScale LS10 можно с легкостью расширить для измерения в двух осях одновременно с помощью дополнительно поставляемых опций. Для компенсации влияния окружающей среды при измерениях лазерным интерферометром используются специальные корректоры температуры, давления и влажности, работающие непрерывно в реальном времени.

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия



Бесконтактный оптический
интерференционный
сканер-профилограф Xi-100



Компьютеризированный контактный
вертикальный интерферометр

Интерферометр вертикальный предназначен в основном для измерения и аттестации концевых мер длины, измерение конгркалибров, аттестация образцовых деталей и т.п. **Интерферометры** применяются как при точных измерениях длин, в частности в станкостроении и машиностроении, так и для оценки качества оптических поверхностей и проверки оптических систем в целом.

Оптические измерения

Тема 3 Рефрактометрия и интерферометрия

С использованием **голографических интерферометров** NANOTOUCH можно:

- Выбрать наиболее качественную и устойчивую к нагрузкам деталь из нескольких внешне идентичных, проанализировав поведение поверхностей под нагрузкой
- Оценить гигроскопичность материала
- Выяснить, является ли деформация необратимой.
- Оптимизировать конструкцию объекта с точки зрения устойчивости к характерным для него нагрузкам
- Выяснить предельно допустимые для детали или узла нагрузки
- Рассчитать ресурс детали
- Выявить скрытые дефекты
- Найти и устранить резонансы или причину повышенной вибрации
- Спрогнозировать развитие деформационных процессов
- Проконтролировать партию деталей на предмет соответствия требованиям по деформационной устойчивости
- Измерить прочность сварки или соединительных конструкций
- Выявить неравномерность реакции объекта на нагрузку (например, найти дефект сварки, место истончения материала или обнаружить наличие скрытых повреждений)
- Проследить развитие трещин
- Оценить текучесть, эластичность, хрупкость материалов
- Разработать объект с заданными деформационными характеристиками, в частности, чтобы в случае поломки из строя выходили дешевые сменные детали, вместо несменных дорогостоящих
- Найти «слабое звено» в конструкции

Оптические измерения

Литература

Захарьевский, А. Н. Интерферометры. М.: Оборонгиз, 1952. – 296 с.

Коломийцов, Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.

Малакара, Д. Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

Ресурсы Интернет и др.

