

Основные схемы интерферометров

Интерферометр - измерительный прибор, в котором используется интерференция волн

- Существуют интерферометры для звуковых и для электромагнитных волн: оптических (ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра) и радиоволн различной длины. Наибольшее распространение получили оптические интерферометры. Они применяются для измерения длин волн спектральных линий, показателей преломления прозрачных сред, абсолютных и относительных длин, угловых размеров звёзд, для контроля качества оптических деталей и их поверхностей, для контроля чистоты обработки поверхностей и т.п.
- Принцип действия всех интерферометров одинаков, и различаются они лишь методами получения когерентных волн и тем, какая величина непосредственно измеряется.
- Пучок света с помощью того или иного устройства разделяется на два или большее число когерентных пучков, которые проходят различные оптические пути, а затем сводятся вместе.

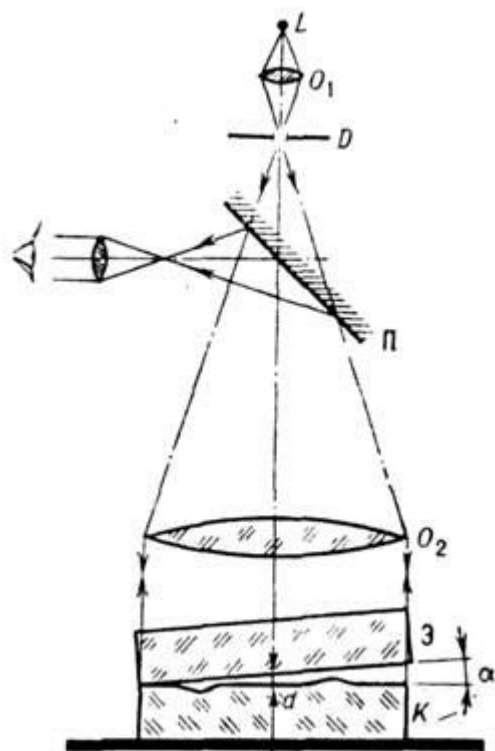
- Для интерференции света необходима прежде всего когерентность пучков.
- Вид интерференционной картины, зависит от способа разделения пучка света на когерентные пучки, от числа интерферирующих пучков, разности их оптических путей (оптической разности хода), относительной интенсивности, размеров источника, спектрального состава света.
- Методы получения когерентных пучков в интерферометрах очень разнообразны, поэтому существует большое число различных конструкций.

Интерферометр Ньютона

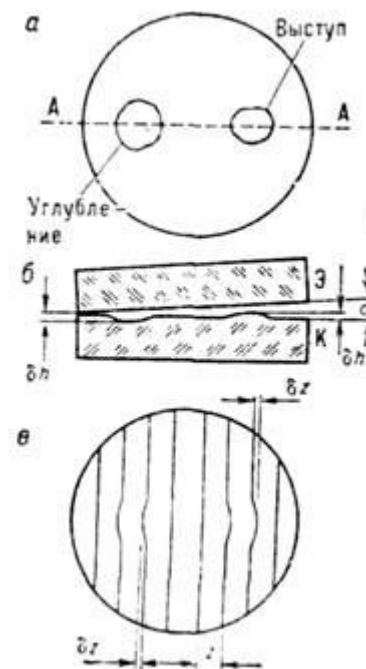
- Несмотря на название, первым его придумал не Исаак Ньютон. В 1663 г. другой англичанин, Роберт Бойль, первым обнаружил кольца Ньютона, а через два года опыт и открытие были независимо повторены Робертом Гуком. Ньютон же подробно исследовал это явление, обнаружил закономерности в расположении и окраске колец, а также объяснил их на основе корпускулярной теории света
- Интерферометр Ньютона содержит две поверхности, находящиеся в контакте и освещенные светом.
- Интерференцию света от двух поверхностей можно увидеть при обычном освещении. В этом случае они должны быть расположены очень близко друг к другу



- **Интерферометром Ньютона** называют любое устройство, содержащее две оптические полированные поверхности, находящиеся в контакте и освещенные монохроматическим светом



- Одна из поверхностей **эталонная**, другая контролируемая. В этих условиях воздушный зазор обычно равен нескольким длинам световой волны
- Контроль в различных схемах интерферометра Ньютона заключается в определении величины зазора путем интерпретации вида интерференционных колец



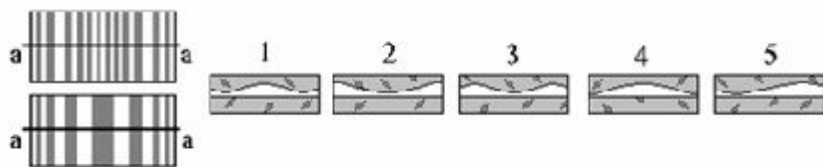
- Тяжелые объекты деформируют поверхность пробного стекла, при этом точность измерений снижается, поэтому их контролируют, помещая эталон сверху

Исаак Ньютон (04.01.1643 года - 31.03.1727 года)



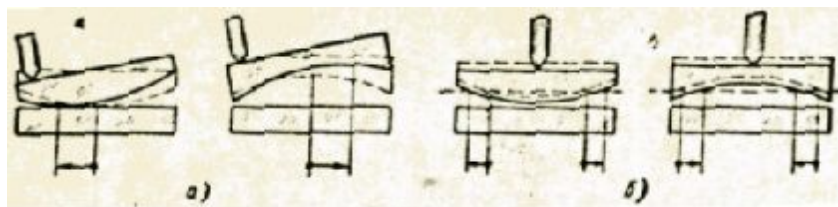
- Выдающийся английский учёный, заложивший основы современного естествознания, создатель классической физики
- член Лондонского королевского общества (1627), президент (с 1703)
- Работы относятся к механике, оптике, астрономии, математике
- Научное творчество Ньютона сыграло исключительно важную роль в истории развития физики
- В его честь названа единица сила в Международной системе единиц - ньютон

- Определите, какие два зазора из представленных пяти соответствуют данным системам интерференционных полос



- Наиболее часто интерферометр Ньютона применяется для контроля плоских поверхностей и контроля поверхностей небольших линз во время их полирования

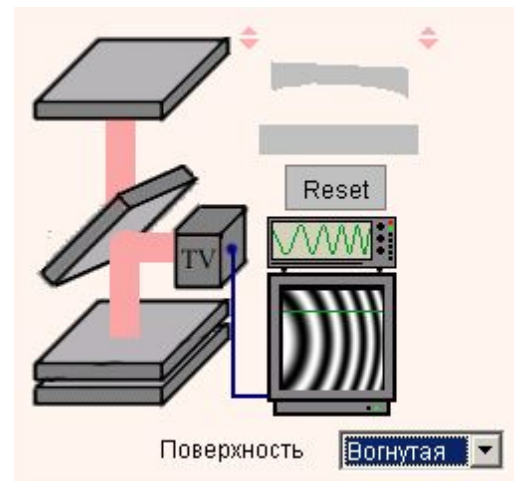
- Необходимо также знать, является ли контролируемая поверхность выпуклой или вогнутой.
- Это можно установить нажатием деревянной палочкой на край верхней плоскости. Если поверхность выпуклая, центр системы полос передвигается к точке нажатия, и наоборот.
- При втором способе нажимают на верхнюю поверхность в центре системы полос. Если поверхность выпуклая, диаметр колец увеличивается и наоборот.



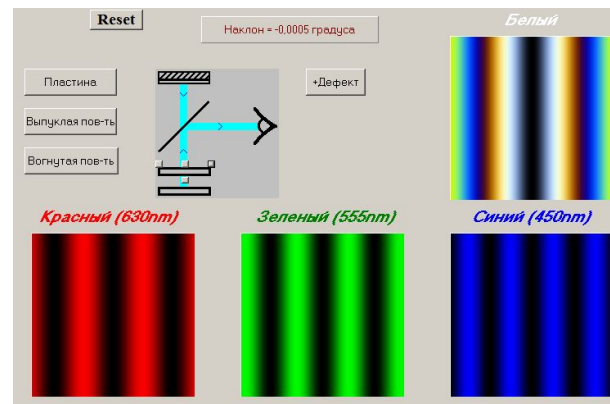
- Третий способ определения знака кривизны поверхности предполагает использование источника белого света. Если слегка нажать на центр выпуклой детали, воздушный зазор в этой точке стремится к нулю и, следовательно, здесь образуется темная полоса, а светлая полоса — почти бесцветная или белая. Следующая светлая полоса окрашена в голубоватый цвет изнутри и красноватый снаружи.
- Если поверхность вогнутая, контакт осуществляется не в точке, а по окружности и толщина воздушного зазора стремится к нулю вдоль нее. Темная полоса в этом случае располагается по окружности, а последовательность окрашенных полос такая же, как и прежде.
- Этот способ из-за его сложности не используется в производственных условиях, особенно если обе поверхности нельзя сделать идеально чистыми

- Наиболее часто интерферометр Ньютона применяется для контроля плоских поверхностей и контроля поверхностей небольших линз во время их полирования

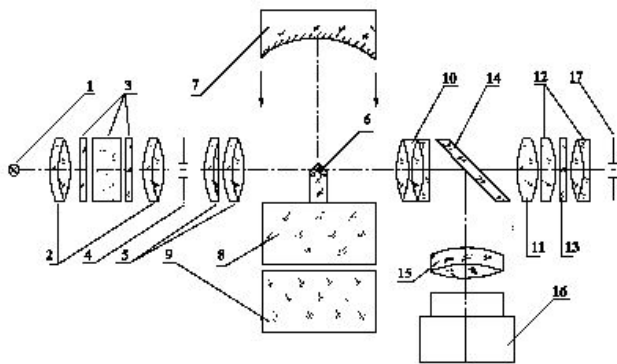
- *Интерферометр Ньютона/nuton2.html*



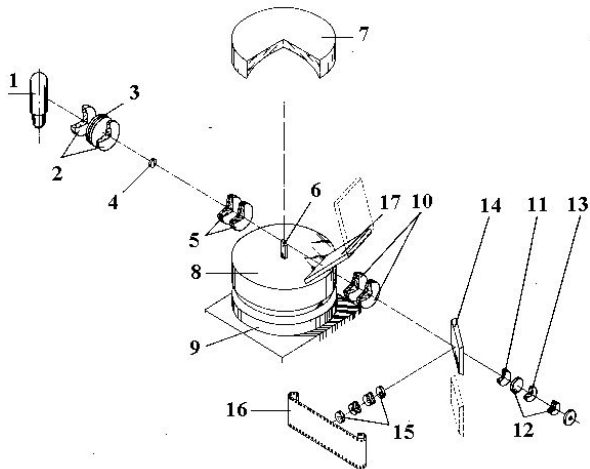
- *Интерферометр Ньютона/Nuton2plast/nuton2pilast.exe*



- Реальные приборы, конечно значительно сложнее.
- Для измерения плоскостности оптических поверхностей используется промышленные интерферометры типа Физо ИТ-200, ИТ-100.



- Оптическая схема интерферометра



- Структурная схема



- Обычно оптические поверхности изготавливают с точностью

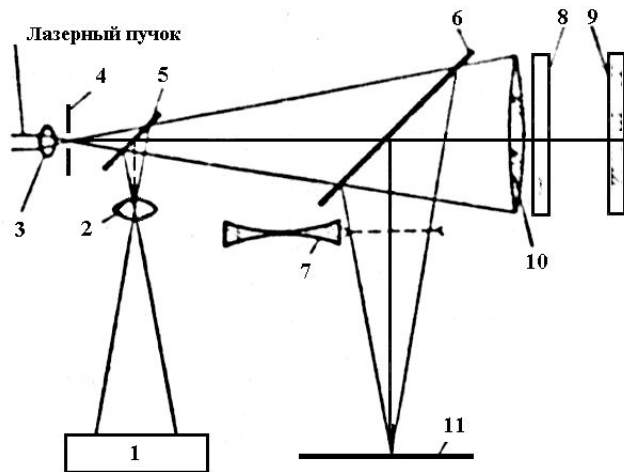
$$2\lambda - \lambda/100.$$

- Визуальными наблюдением на интерферометре Ньютона можно определить максимальные погрешности до $\lambda/10$
- Этапы шлифовки стекла для получения плоскопараллельной пластины



Интерферометр Физо

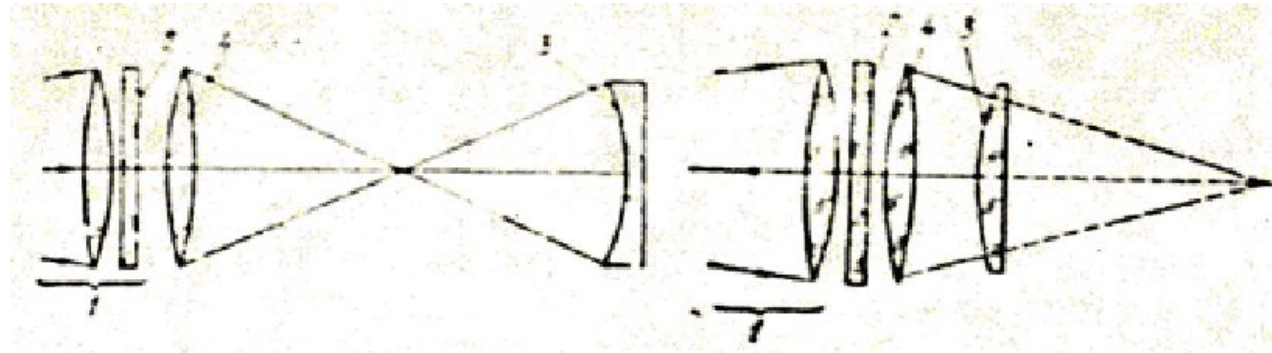
- Интерферометр Физо позволяет получить интерференционную картину при значительно большем воздушном зазоре, чем интерферометр Ньютона. При этом повышаются требования к системе освещения, поэтому в интерферометре Физо необходима коллимирующая система.



- Интерферометр Физо для контроля плоских поверхностей

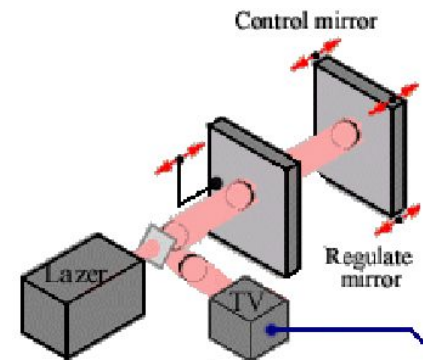
(1. Устройство регистрации, 2. Фотообъектив, 3. Микрообъектив, 4. Пространственный фильтр (точечная диафрагма), 5,6. Светоделитель, 7. Отрицательная линза, 8. Эталонная плоскость, 9. Контролируемая плоскость, 10. Объектив коллиматора, 11. Матовый экран для наблюдения полос).

- Используя расходящиеся или сходящиеся пучки света на интерферометре Физо можно контролировать выпуклые и вогнутые поверхности



1 – коллимирующая система, 2 – эталон, 3 – контролируемая поверхность

Интерферометр Физо/fizo.htm

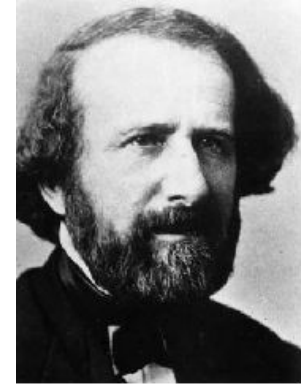


- В интерферометре Физо большая часть для обоих пучков одинакова, поэтому оптическая схема устойчива к вибрациям.
- Этот тип интерферометров наиболее часто встречается в измерительных системах для контроля оптических поверхностей.



Физо Арман Ипполит Луи
Fizeau, Armand-Hippolyte-Louis
(1819—1896)

французский физик-оптик

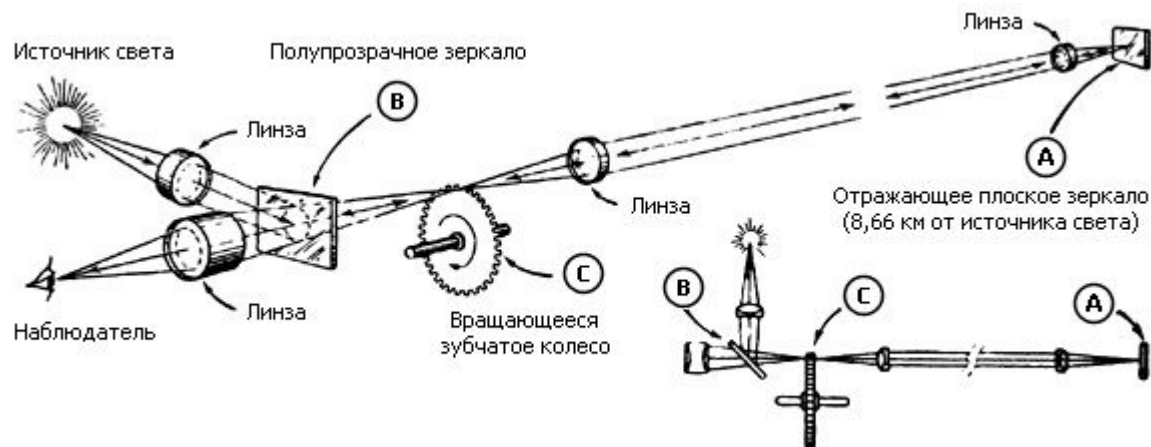


- Родился 23 сентября 1819 в Париже в семье профессора медицины
- Мечтая пойти по стопам отца, поступил на медицинский факультет Парижского университета. Из-за болезни был вынужден прервать учебу и уехать из столицы. Когда же он вернулся в Париж, то отказался от изучения медицины и решил заняться физикой
- Поступил в Коллеж де Франс, где прослушал курс лекций известного физика-экспериментатора В.Реньо, посещал лекции в Политехнической школе. Учился в Парижской обсерватории под руководством Ф. Араго. В 1863 стал профессором Политехнической школы в Париже

- Первым серьезным достижением Физо в оптике были опыты по интерференции света с использованием монохроматического излучения. Они были поставлены им в 1846 совместно с Фуко, однако сотрудничество ученых длилось недолго, вскоре они порознь занялись проблемой измерения скорости света в земных условиях
- В 1849 Физо поставил ставший классическим опыт по определению скорости света с помощью зубчатого колеса (метод Физо). Еще до постановки этого опыта, в 1848, Физо опубликовал теоретическую работу, в которой независимо от Доплера сформулировал идею о зависимости частоты света, воспринимаемой наблюдателем, от относительного движения источника и наблюдателя
- Первым измерил скорость света в земных условиях
- Интерес к оптике движущихся тел привел Физо к постановке опытов по исследованию распространения света в движущейся воде. Он установил влияние движения среды (воды) на скорость света (опыт Физо, 1851). Этим опытом он доказал, что свет частично увлекается средой, и это сыграло важную роль в подтверждении релятивистской формулы сложения скоростей

- Дал верную интерпретацию эффекта Доплера в оптике (эффект Доплера – Физо, 1848)
- Обнаружил фраунгоферовы линии в инфракрасной части спектра (вместе с Л. Фуко, 1844-47)
- Разработал метод наблюдения интерференции при больших разностях хода лучей (1849) и интерференционный метод измерения коэффициентов расширения твердых тел и углового диаметра звезд (1852)
- Сконструировал много приборов: индукционную катушку, интерференционный спектроскоп, дилатометр; он также исследовал кристаллы, занимаясь фотографией
- В 1875 Физо был избран членом Лондонского королевского общества, в 1866 награжден медалью Румфорда

В 1849 Физо первым измерил скорость света по времени прохождения светом точно известного расстояния



- Пучок света от источника, отражённый полупрозрачным зеркалом, периодически прерывался вращающимся зубчатым диском, проходил базу (около 8 км), отразившись от зеркала, возвращался к диску.
- Попадая на зубец, свет не достигал наблюдателя, а попавший в промежуток между зубцами свет можно было наблюдать через окуляр. По известным скоростям вращения диска определялось время прохождения светом базы.
- Если возвращаясь, свет наталкивается на зуб, то он не проходит. Виден он будет только тогда, когда за время прохождения светом пути $2D$ колесо повернется на целое число зубьев.

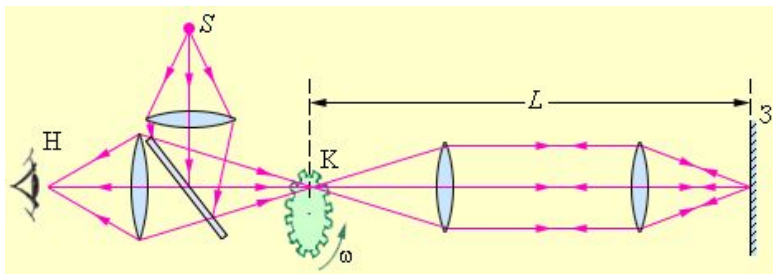
- Если n - число зубцов, N - число оборотов колеса в сек., K - число зубцов, проходящих за время двойного прохождения света по пути D , то

$$V = \frac{2NnD}{K}.$$

- K - выбираем подбором, наиболее соответствующим нашему знанию о скорости. Таким образом, зная, что K - целое число, можно значительно увеличить точность измерений.
- Пусть δK - ошибка подсчета числа K (практическая ошибка, установления равенства интенсивностей восходящей и нисходящей ветвей интенсивности). Тогда

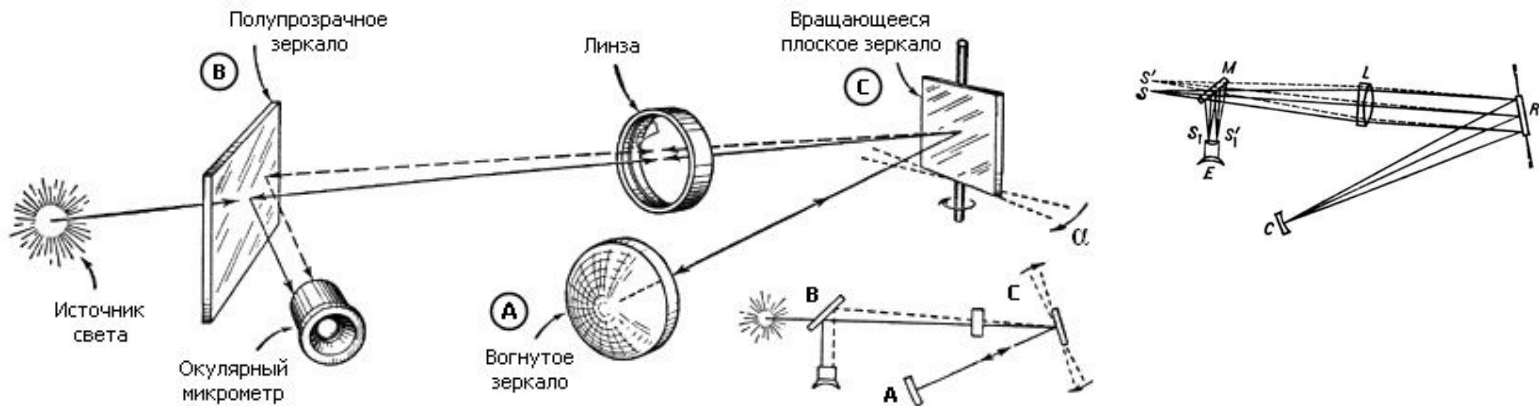
$$\frac{\partial V}{V} = \frac{\partial K}{K}.$$

- Поэтому желательно делать K по возможности большим. В опытах Физо это число было от 5 до 7, и результат получался с точностью до $1/300$. Действительно, результат получался всего на 5% больше истинного. Физо получил значение $c = 313300$ км/с. Слабостью этого метода было то, что момент наибольшей яркости света определялся наблюдателем на глаз.



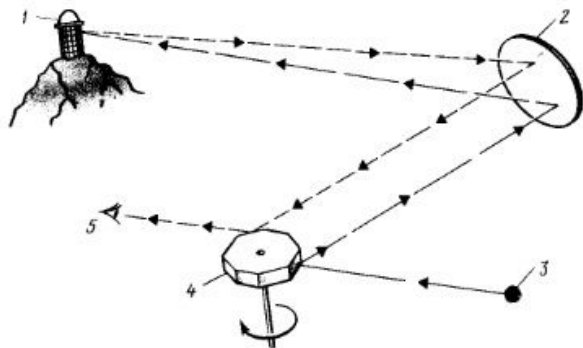
- В одном из опытов Физо колесо имело $n=720$ зубьев, и наблюдатель воспринимал отраженный свет при частоте вращения колеса $N=25,2$ оборота в секунду. Расстояние между колесом и отражающим зеркалом составляло $L = 8,63$ км.

- **В 1862 Фуко (J.V.L. Foucault) реализовал высказанную в 1838 идею Араго (D. Arago), применив вместо зубчатого диска быстровращающееся (512 об/с) зеркало.**
- Отражаясь от зеркала, пучок света направлялся на базу и по возвращении вновь попадал на это же зеркало, успевшее повернуться на некоторый малый угол



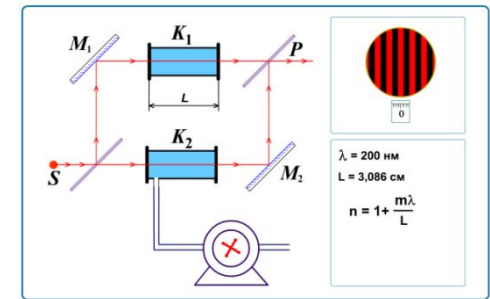
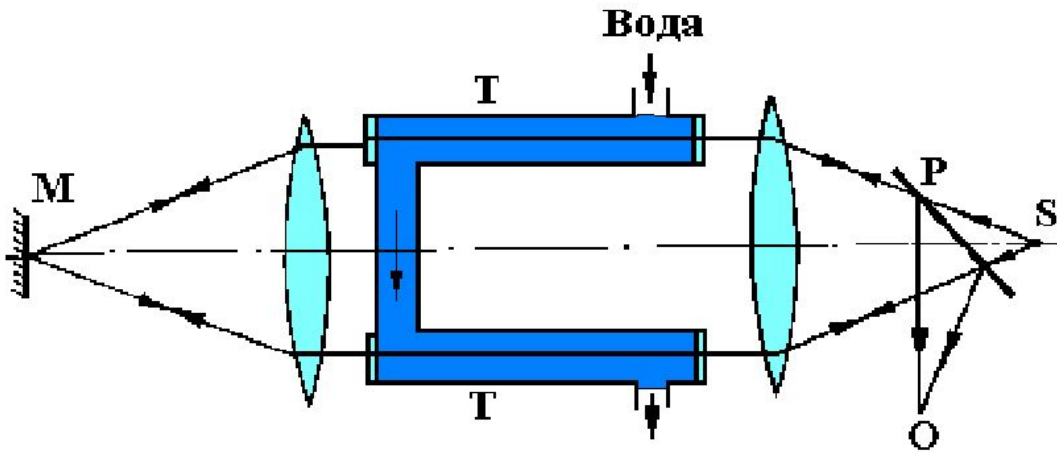
- **Скорость света устанавливают, измеряя смещение SS' .**
- При базе всего в 20 м Фуко нашёл, что скорость света равна 29800080 ± 500 км/с. Схемы и основные идеи опытов Физо и Фуко были многократно использованы в последующих работах по определению скорости света. В современных измерениях скорости света используется модернизированный метод Физо (модуляционный метод) с заменой зубчатого колеса на электро-оптический, дифракционный, интерференционный или какой-либо иной модулятор света, полностью прерывающий или ослабляющий световой пучок.

- **В 1927 Майкельсоном была применена усовершенствованная схема установки с вращающимся зеркалом**



1 - зеркало на горе Сан-Антонио на расстоянии 35,2 км,
 2 - зеркало на горе Вильсон, 3 - источник света,
 4 - зеркальный вращающийся восьмиугольник,
 5 - наблюдатель.

- Источник света был помещен в фокусе линзы таким образом, что выходящий из нее пучок сохранял параллельность на большом расстоянии.
- Свет от источника направляли на вращающееся восьмиугольное зеркало, с него на зеркало, установленное на горе Вильсон, а затем - на горе Сан-Антонио. Затем в обратном направлении на восьмигранное зеркало и к наблюдателю. Общее расстояние около 70 км. Зная угловую скорость вращения зеркального барабана, можно определить время, затрачиваемое светом на прохождение этого пути и определить скорость света. Полученное Майкельсоном (А. Michelson) в 1926 значение $c = 299796 \pm 4$ км/с было тогда самым точным и вошло в таблицы физических величин.
- Решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным для науки и техники - КОДАТА (1973), проанализировавшей все имеющиеся данные, их достоверность и погрешность, скорость света в вакууме принято считать равной **299792458 ± 1,2 м/с**.



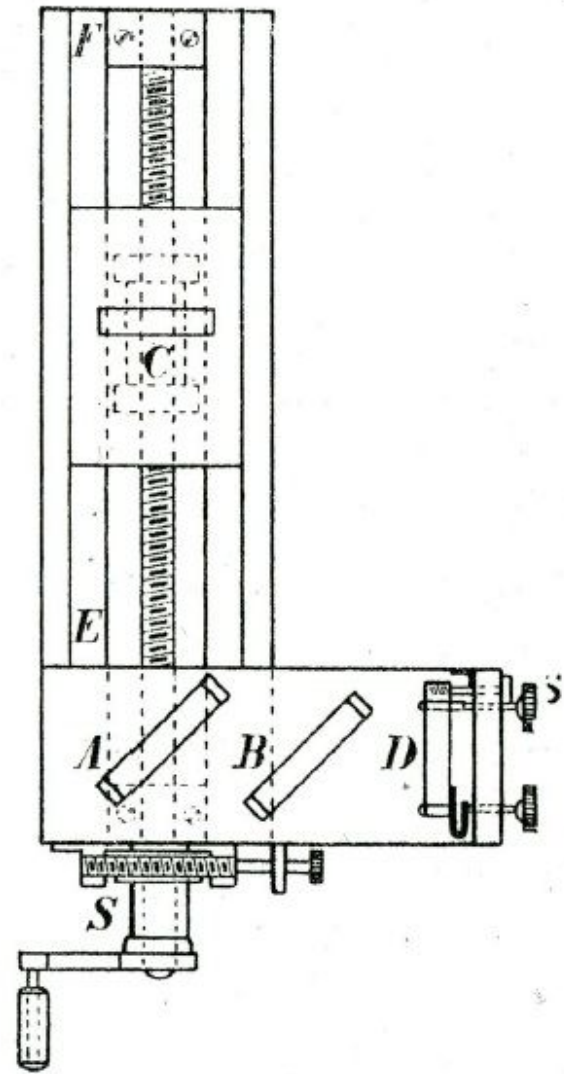
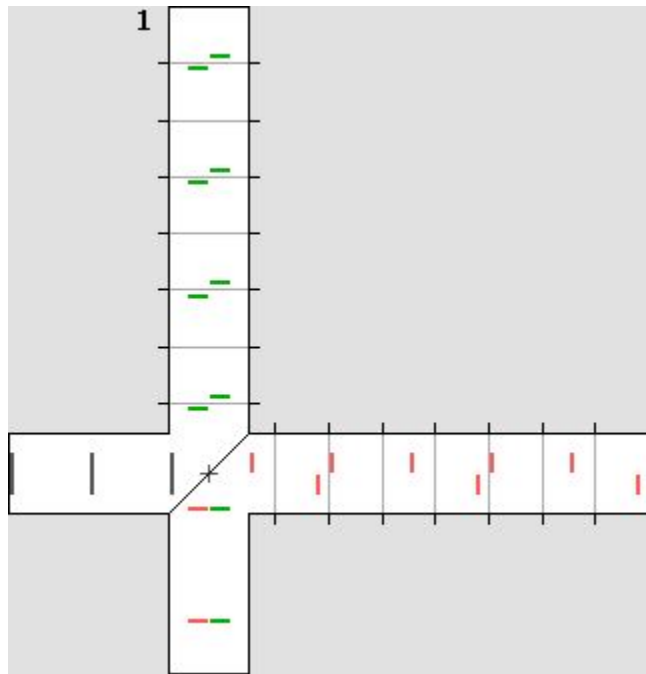
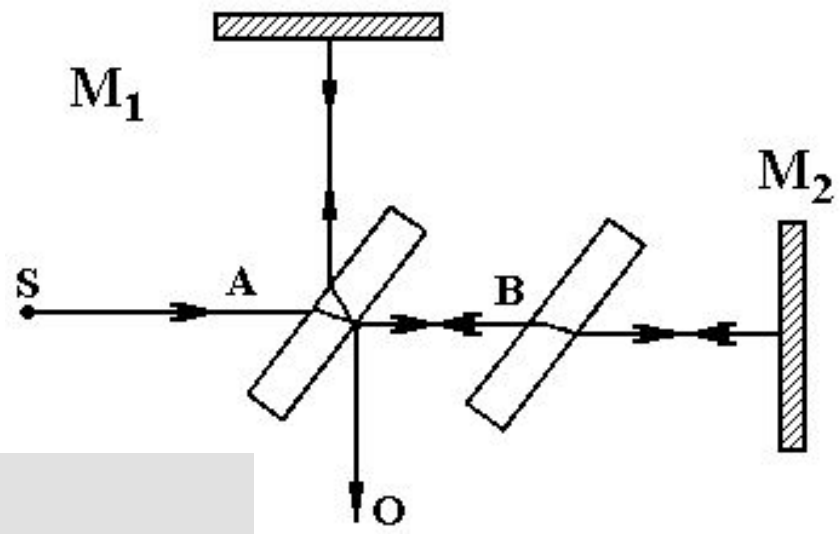
Опыт Физо/fla60.swf

- Свет от источника **S** проходил через две полуметровые трубки **T**, по которым со скоростью нескольких метров в секунду пропусклась вода
- Зеркало **M** отражало лучи так, чтобы они менялись местами, через те же трубки возвращалась назад и интерферировали в области **O**
- Так как оба луча проходили один и тот же путь, то нестабильность его оптических характеристик не влияла на смещение интерференционных полос. Это смещение определялось только скоростью воды, поскольку один луч двигался по течению, а другой – против
- Опыт показал, что свет частично увлекается движущейся средой. Коэффициент увлечения света движущейся средой, предложенный **Физо**, получается из релятивистской формулы сложения скоростей

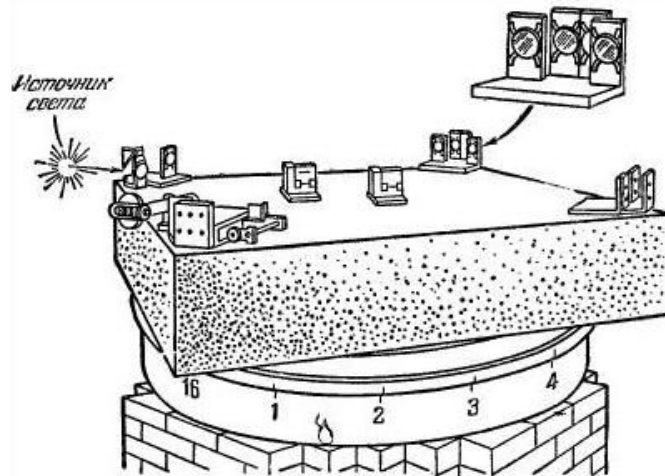
- В физике конца 19 века предполагалось, что свет распространяется в некоторой универсальной среде - эфире.
- Из расчетов Максвелла получалось труднообъяснимое следствие: колебания электрического и магнитного полей — поперечные. А поперечные колебания распространяются только в твердых телах, но не в жидкостях и газах. К тому времени было надежно измерено, что скорость поперечных колебаний в твердых телах (попросту скорость звука) тем выше, чем тверже среда (чем больше модуль Юнга и меньше плотность) и может достигать нескольких километров в секунду.
- Скорость поперечной электромагнитной волны была почти **в сто тысяч раз выше**, чем скорость звука в твердых телах. А характеристика жесткости входит в уравнение скорости звука в твердом теле под корнем. Получалось, что среда, через которую идут электромагнитные волны (и свет), имеет чудовищные характеристики упругости. Возник крайне тяжелый вопрос: «Как же через такую твердую среду движутся другие тела и не чувствуют ее?»
- Гипотетическую среду называли — **эфиром**, приписав ему одновременно странные и, вообще говоря, взаимоисключающие свойства — огромную упругость и необычайную легкость.

Интерферометр Майкельсона

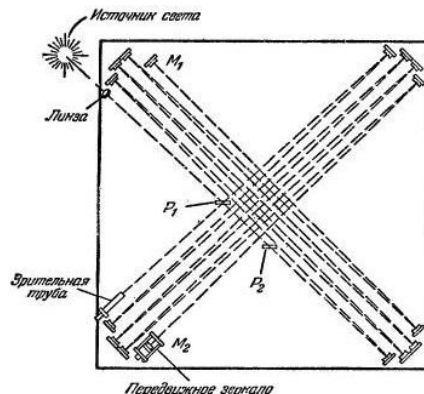
- В конце XIX - начале XX века Альберт Майкельсон в поисках "эфирного ветра" изобрел интерферометр.
- Ряд явлений, например опыт Физо, приводил к заключению, что эфир частично увлекается телами при их движении.
- Согласно гипотезе неподвижного эфира, можно наблюдать "эфирный ветер" при движении Земли сквозь эфир, и скорость света по отношению к Земле должна зависеть от направления светового луча относительно направления ее движения в эфире.
- Если расположить интерферометр так, чтобы направление одного луча совпадает с вектором скорости вращения Земли вокруг Солнца (30 км/с), другое - перпендикулярно ему. Различное время прохождения лучей должно привести к разности хода и смещению интерференционных полос. Если эфир неподвижен, то при повороте прибора на 90° разность хода лучей должна менять знак.



- В 1881 г. Майкельсон осуществил знаменитый опыт, с помощью которого он рассчитывал обнаружить движение Земли относительно эфира (эфирный ветер). В 1887 г. Майкельсон повторил свой опыт совместно с Морли на более совершенном приборе.



Установка Майкельсона — Морли

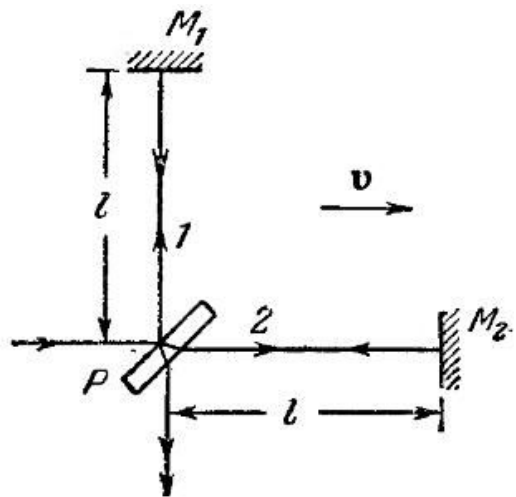


Кирпичное основание поддерживало кольцевой чугунный желоб с ртутью. На ртути плавал деревянный поплавок, имеющий форму нижней половины разрезанного вдоль бублика.

На поплавок устанавливалась массивная квадратная каменная плита. Такое устройство позволяло очень плавно без толчков поворачивать плиту вокруг вертикальной оси прибора.

На плите монтировался интерферометр Майкельсона, видоизмененный так, что оба луча, прежде чем вернуться к полупрозрачной пластинке, несколько раз проходили туда и обратно путь, совпадающий с диагональю плиты.

Прибор находился все время в медленном вращении, чтобы избежать деформаций интерферометра.



Опыт основывался на следующих соображениях.

Предположим, что плечо интерферометра PM_2 совпадает с направлением движения Земли относительно эфира. Тогда время, необходимое лучу 1, чтобы пройти путь до зеркала M_1 и обратно, будет отлично от времени, необходимого для прохождения пути PM_2P лучом 2.

В результате, даже при равенстве длин обоих плеч, между лучами 1 и 2 возникнет некоторая разность хода.

Если повернуть прибор на 90° , плечи поменяются местами и разность хода изменит знак.

Это должно привести к смещению интерференционной картины, величину которого, как показывают соответствующие расчеты, вполне можно было бы обнаружить.

Ожидаемое смещение полос из-за вращения земли 0,4 полосы. Максимальное обнаруженное смещение 0,02 полосы, а среднее много меньше 0,01 полосы. Чтобы исключить возможность того, что в момент измерения плоскость горизонта оказалась перпендикулярной к вектору орбитальной скорости Земли, опыт повторялся в различное время суток. Опыт позволил утверждать, что скорость эфирного ветра не может превышать 7 км/с.

Опыт Майкельсона неоднократно повторялся другими физиками с улучшенной аппаратурой. К началу 30-х годов было с достоверностью установлено, что скорость эфирного ветра, если он и существует, не может превышать 1-1,5 км/с.

Отрицательный результат опыта Майкельсона доказывает, что в земной системе отсчета скорость света не зависит от направления его распространения.

Результаты были отрицательными, и Майкельсон вынужден был сделать вывод, что гипотеза покоящегося эфира ошибочна.

- Майкельсон также использовал этот интерферометр для определения с высокой точностью длины волны *красной линии кадмия*.

- Если интерферометр настроен на полосы бесконечной ширины (т.е. угол между интерферирующими пучками равен нулю), то при перемещении одного из зеркал M_1 или M_2 вдоль оси, падающего на него пучка света, результирующая интенсивность I будет периодически меняться с изменением разности хода лучей

$$I(\delta) = I_0 + I_m \cos \frac{4\pi}{\lambda} (\delta_1 - \delta_2)$$

- Переходу от светлого поля к темному соответствует изменение разности хода на λ (λ - длина волны, падающего на интерферометр света. Для случая смещения зеркала в пространстве выражение для интенсивности суммарной волны может быть переписано в виде:

$$I(\Delta X) = I_0 + I_m \cos \left(2\pi \frac{2\Delta X}{\lambda} - \varphi_1 \right)$$

- Где φ_1 начальная фаза интерференции.

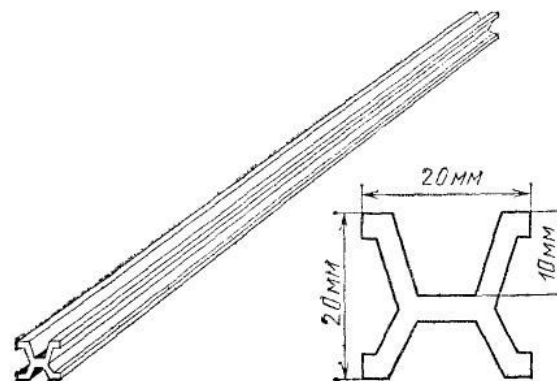
- Регистрируя за время перемещения зеркала число N (число полных периодов изменения интенсивности), и зная значение длины волны, можно с точностью до целого числа длин волн определить разность хода

$$\delta = N\lambda$$

- И, наоборот, можно определить длину световой волны, если точно известна величина смещения Δx :

$$\lambda = 2\Delta X / N$$

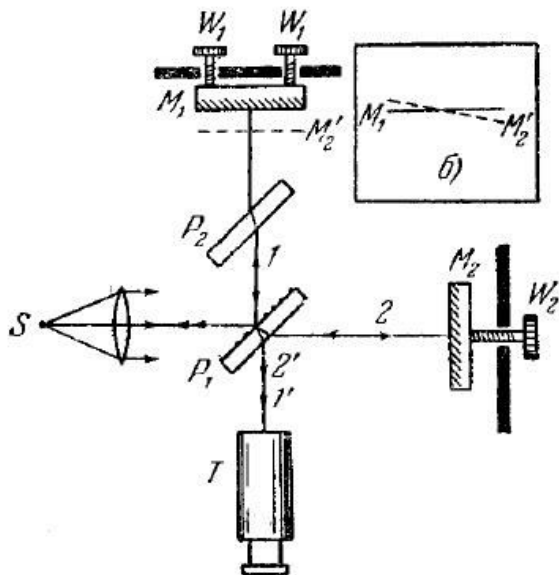
- Майкельсон выполнил первое точное измерение длины волны красной линии кадмия в 1890-1895 гг. Использовался свет красной линии паров кадмия с $\lambda \sim 644$ нм, характеризующийся наибольшей известной тогда длиной когерентности. При этом пришлось использовать ряд промежуточных эталонов, длина которых определялась расстоянием между двумя зеркалами, укрепленными строго параллельно на массивном металлическом основании.
- Измерение проводилось сравнением с длиной нормального метра в Международном Бюро мер и весов в Севре близ Парижа. Эталон длины представлял собой расстояние между двумя штрихами, выгравированными на стержне из сплава платина-иридий, при температуре 0°C .





Первоначально за основу было принято определение метра (8.05.1790) как длина маятника с полупериодом качания на широте 45° , равным 1с. Однако, поскольку ускорение свободного падения зависит от широты и, следовательно, маятниковый эталон недостаточно воспроизводим, Французская Академия наук в 1791 предложила определить метр через длину меридиана. 30.03.1791 это предложение было принято. Метр - одна сорокамиллионная часть Парижского меридиана (то есть одна десятимиллионная часть расстояния от северного полюса до экватора по поверхности земного эллипсоида на долготе Парижа).

Первый прототип эталона метра был изготовлен из латуни в 1795 году. В 1889 был изготовлен более точный международный эталон метра. Этот эталон изготовлен из сплава 90% платины и 10% иридия и имеет поперечное сечение в виде буквы «X».



На рис приведена схема интерферометра. Интерференционная картина наблюдается с помощью зрительной трубы Т. Наблюдаемая картина зависит от юстировки зеркал и от характера пучка света, падающего на прибор. Разность хода удобно оценивать, заменив мысленно зеркало M_2 его мнимым изображением M_2^I в полупрозрачной пластинке P_1 .

С помощью юстировочных винтов W_1 можно изменять угол между этими плоскостями, в частности их можно устанавливать строго параллельно друг другу. Вращая микрометрический винт W_2 , можно плавно перемещать зеркало M_2 не меняя его наклона.

Если падающий пучок параллелен, а плоскости зеркал M_1 и M_2^I образуют угол не равный нулю, то в поле зрения прибора наблюдаются прямолинейные полосы равной толщины, расположенные параллельно линии пересечения плоскостей M_1 и M_2^I .

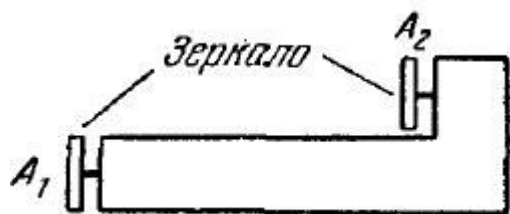
При строго параллельном расположении плоскостей M_1 и M_2^I и слегка расходящемся пучке света в поле зрения прибора наблюдаются полосы равного наклона в виде колец. При вращении микрометрического винта W_2 кольца увеличиваются или уменьшаются в размере. Смещение картины на одну полосу соответствует перемещению зеркала M_2 на половину длины волны.

В белом свете все полосы, кроме нулевой будут окрашены. Нулевая полоса будет **черной**, поскольку луч 1 отражается от пластинки P_1 снаружи, а луч 2 изнутри, что дает разность фаз π . Полосы в белом свете наблюдаются лишь при малой разности хода волн, в монохроматическом свете максимальная разность хода зависит от длины когерентности.

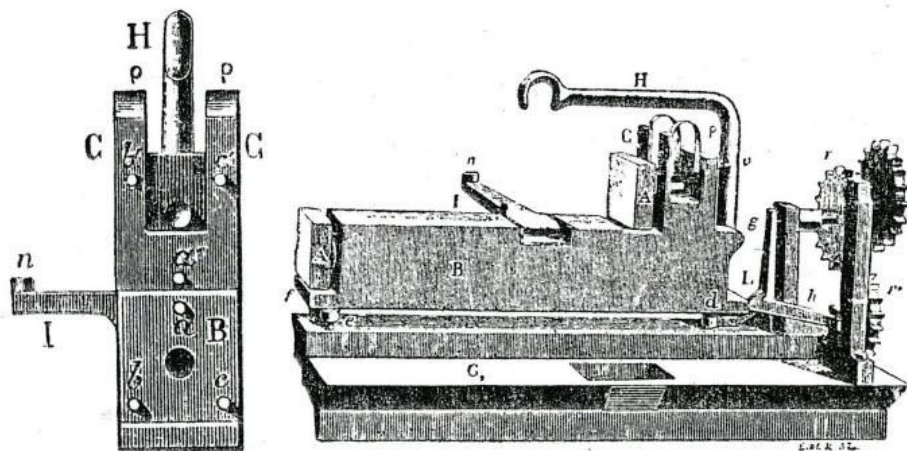
Майкельсон наблюдал 500 000 длин волн (разность хода около 150 мм).

Однако подсчет нескольких сотен тысяч полос очень утомителен и ненадежен. Несомненно, можно предложить ряд способов для автоматизирования этого процесса. Однако, возможность просчета одной или нескольких полос имеет здесь настолько серьезное значение, что лучше применить более надежный способ.

Майкельсон предложил расстояние, которое нужно было измерить (100 мм), делить на более мелкие отрезки, чтобы число полос подлежащее измерению было гораздо меньше. Так, если построить второй промежуточный стандарт в 50 мм, третий в 25 мм и т.д. до $100:2^8 = 0,390625$, то последний содержит только 600 длин волн или 1200 полос в интерферометре Майкельсона. Это число можно сосчитать вручную.



Для измерения эталона метра было изготовлено девять специальных эталонов длины. Каждый эталон представлял собой два параллельных зеркала A_1 и A_2 , укрепленных на металлическом основании.

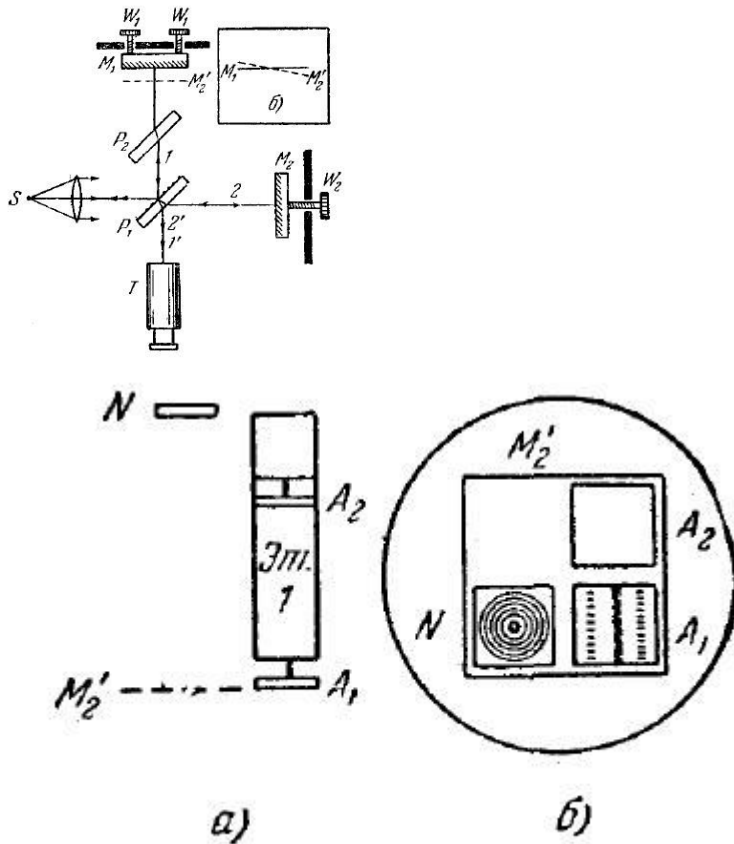


Зеркала соприкасаются с тремя медными штифтиками a , b , c , которые шлифуются и полируются до тех пор, пока поверхности становятся параллельными с необходимой степенью точности.

Расстояние между плоскостями зеркал определяло длину эталона.

Первый эталон имел длину 0,390625 мм. Длина каждого последующего превышала длину предыдущего точно в два раза. Последний, девятый, эталон имел длину 100 мм.

Вначале определялось число длин волн, укладывающихся на длине первого эталона. *Эталон устанавливался вместо зеркала M_1* . Рядом помещалось вспомогательное зеркало N .



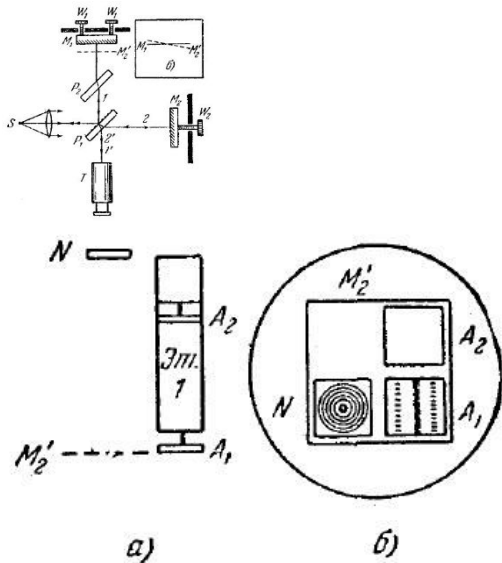
Зеркало N устанавливалось строго параллельно плоскости M_2^I . Поэтому при освещении прибора монохроматическим светом, соответствующим красной линии кадмия, в части поля зрения, образованной отражением от зеркала N , наблюдались полосы равного наклона в виде колец (левая нижняя часть рис. б), на котором показана картина полос).

Угол, образованный плоскостями зеркал A_1 и A_2 с плоскостью M_2^I был слегка отличен от нуля. При освещении прибора белым светом и пересечении плоскости M_2^I с одним из зеркал эталона в трубе, наведенной на это зеркало, получалась нулевая черная полоса.

Эти картины наблюдались поочередно.

Первоначально плоскость M_2^I приводилась (путем перемещения зеркала M_2) в такое положение, чтобы нулевая полоса пришлась на середину зеркала A_1 .

Затем прибор вместо белого света освещался монохроматическим, труба наводилась на бесконечность и в левой нижней части поля зрения возникала система колец. Медленным вращением микрометрического винта W_2 плоскость M_2^I смещалась в направлении зеркала A_2 . При этом кольца стягивались к центру и исчезали. Смещение картины на одну полосу соответствовало перемещению плоскости M_2^I на половину длины волны. В конце концов плоскость M_2^I приводилась в такое положение, при котором в белом свете получалась черная полоса, совпадающая с серединой зеркала A_2 (при этом в правом верхнем углу поля зрения наблюдается такая картина, какая изображена в правом нижнем углу на рис., б). Половина сосчитанного к этому времени количества исчезнувших колец давала число длин волн, укладывавшихся на длине первого эталона.



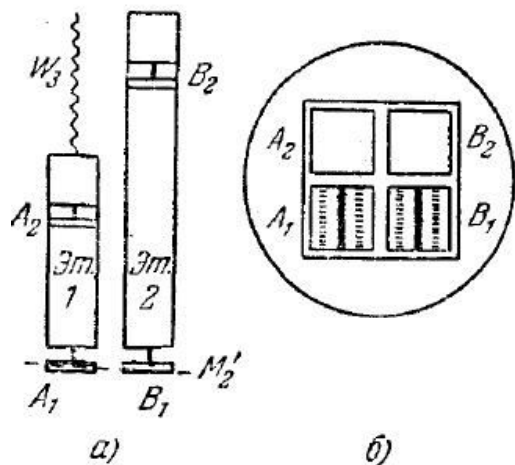
Число интерференционных полос, сосчитанных во время движения, дает целую часть искомого числа.

Дробную часть находят, очень тщательно устанавливая нулевую плоскость так, чтобы она давала круговую интерференцию на плоскостях A_1 и A_2 . Если фаза интерференционных колец одна и та же на A_1 и A_2 , то дробная часть равна нулю, если же это не имеет места, то компенсирующее плоско-параллельное зеркало P_2 поворачивают на очень малый угол до совпадения фаз. Разность фаз, соответствующая дробному излишку легко установить, если установка предварительно откалибрована.

Такой подсчет, сделанный для трех линий кадмия, приводит к следующему результату:

- Красная 1212,37
- Зеленая 1534,79
- Синяя 1626,18

Имея число волн и дробную часть можно сделать **следующий шаг** - сравнить эталон со следующим, в два раза большим.



Для сравнения первых двух эталонов они устанавливались рядом вместо зеркала M_1 (рис, а). Эталон 2 был укреплен неподвижно, эталон 1 устанавливался на салазках, которые могли перемещаться вдоль эталона 2 с помощью микрометрического винта W_3 . Поле зрения разделяется на четыре части, каждая из которых соответствует одному из зеркал A_1 , A_2 и B_1 и B_2 . (рис., б). Перемещением зеркала M_2 плоскость M_2^I совмещалась с зеркалом B_1 так, чтобы против середины этого зеркала получалась нулевая черная полоса. При неизменном положении плоскости M_2^I эталон 1 устанавливался так, чтобы такая же черная полоса возникала и против середины A_1 . Наблюдавшаяся при этом картина соответствует рис., б. В этом случае зеркала A_1 и B_1 оказывались расположенными в одной плоскости. Далее плоскость M_2^I приводилась в совпадение с зеркалом A_2 (при этом полосы наблюдались только в квадрате A_2 на рис. 56, б), после чего эталон 1 перемещался так, чтобы с новым положением плоскости M_2^I совпало зеркало A_1 (в этом случае нулевая полоса снова получается в середине квадрата A_1 на рис., б, но в квадрате B_1 полос уже не будет).

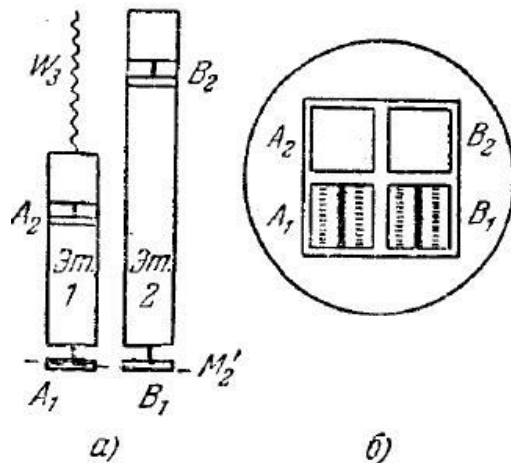
Таким способом эталон 1 перемещался на расстояние, в точности равное его длине.

Затем снова перемещалось зеркало M_2 до тех пор, пока плоскость M_2^I не совпадет с зеркалом A_2 . Если бы длина l_2 эталона 2 точно в два раза превышала длину l_1 эталона 1 нулевая полоса возникала бы одновременно в серединах квадратов A_2 и B_2 . Однако в действительности l_2 немного отличалась от $2l_1$. Поэтому нулевая полоса в B_2 приходилась не на середину зеркала, а была смещена в сторону.

Определяя, какому дробному числу полос соответствует это смещение, можно было найти разность между $2l_1$ и l_2 . Если эта часть равна ε , то $l_2 = 2l_1 + \varepsilon$.

Подобным образом производилось попарное сравнение всех эталонов.

Результаты трех независимых измерений 100 мм эталона приведены ниже:



Серия	Красная	Зеленая	Синяя
1	310678,48	393307,92	416735,86
2	310678,65	393308,10	416736,07
3	310678,68	393308,09	416736,02

Измерения были сделаны в разное время на протяжении нескольких месяцев и различными людьми.

Последний этап десятисантиметровый эталон сопоставлялся с нормальным метром. Эталон перемещался описанным выше способом десять раз. Совпадение зеркал эталона со штрихами нормального метра устанавливалось под микроскопом. Согласно полученным Майкельсоном результатам на длине нормального метра укладывается 1 553 163,5 длин волн красной линии кадмия.

Окончательные результаты:

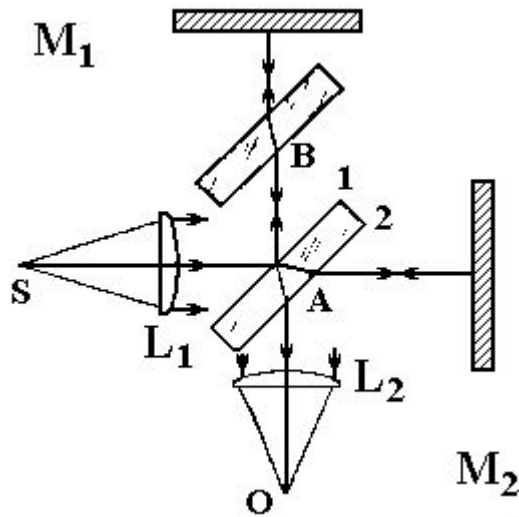
- Красная 1 553 163,5
- Зеленая 1 966 249,7
- Синяя 2 083 372,1

- Согласно полученным Майкельсоном результатам, на длине нормального метра укладывается 1 553 163,5 длин волн красной линии кадмия. Длина волны - 643,84696 нм.
- В результате дальнейших поисков более подходящих источников света была создана стандартная криптоновая лампа, длина когерентности оранжевого излучения которой достигает 0,8 м. Это излучение и положено в настоящее время в основу первичного эталона длины: по определению, 1 м равен 1650763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $5d_5 \rightarrow 2p_{10}$ и атома криптона-86. Такому определению соответствует длина волны $\lambda(\text{Kr}) = 605,780211$ нм.
- Международное бюро мер и весов постановило в 1958 г. и международная система единиц (СИ) установила в то время, что метр — это длина, равная 1 650 763,73 длин волн в вакууме этого излучения.
- **С 1960** было решено отказаться от использования изготовленного людьми предмета в качестве эталона метра, и с этого времени **по 1983** метр определялся как число 1 650 763,73, умноженное на длину волны оранжевой линии (6 056 Å) спектра, излучаемого изотопом криптона ^{86}Kr в вакууме.

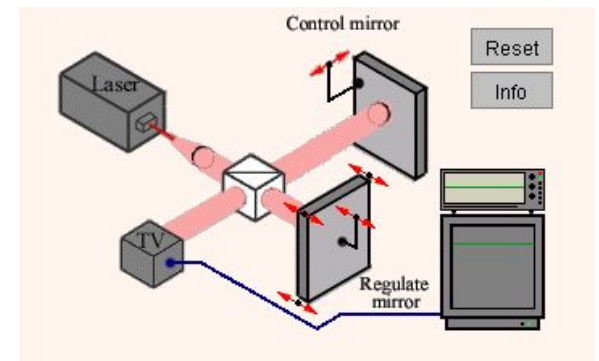
- Современное определение метра в терминах времени и скорости света было принято XVII Генеральной конференцией по мерам и весам в 1983 году.
- Метр — это длина пути, проходимого светом в вакууме за $(1 / 299\,792\,458)$ секунды.
- Из этого определения следует, что в системе СИ скорость света в вакууме принята равной в точности $299\,792\,458$ м/с.
- Таким образом, определение метра, как и два столетия назад, вновь привязано к **секунде**, но на этот раз с помощью универсальной мировой константы — скорости света.
- Современный эталон длины основан на цезиевом стандарте частоты.

Интерферометр Тваймана-Грина

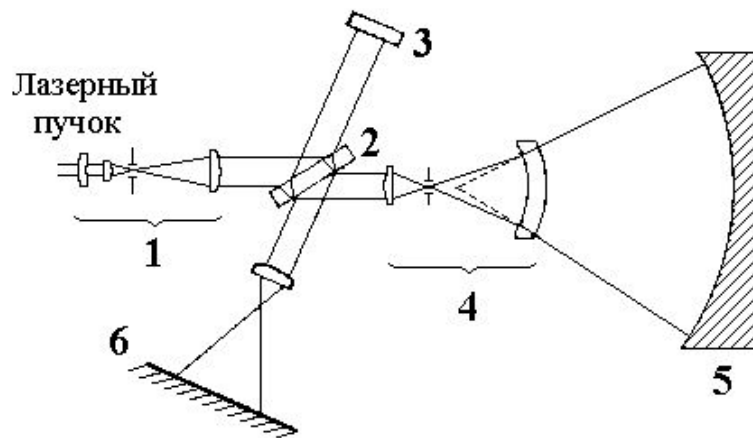
- Интерферометр Тваймана-Грина является модификацией интерферометра Майкельсона.
- Он был предложен и запатентован Твайманом и Грином в 1919 г. для контроля призм и микрообъективов.



- 1 - источник света;
- 2 - компенсатор;
- 3 - глаз наблюдателя;
- M_1 и M_2 - зеркала;
- L_1 и L_2 - объективы.



- С появлением лазера в оптических цехах вошло в практику использование интерферометров Тваймана-Грина с большой разностью оптического хода.
- На рис. изображен неравноплечий интерферометр для производственного контроля оптических деталей.



Неравноплечий интерферометр Хьюстона.

(1 - расширитель лазерного пучка; 2 - светоделитель, расположенный под углом Брюстера; 3 - регулируемое зеркало; 4 - расширитель пучка; 5 - контролируемое зеркало; 6 - экран)

Светоделитель с углом клина $2'-3'$ установлен под углом Брюстера. Отражающая поверхность светоделителя расположена так, чтобы воспринимать возвращающиеся лучи и устранять астигматизм и другие нежелательные эффекты.

В рабочую ветвь устанавливается двухлинзовый расширитель пучка света, изготовленный из стекла с высоким коэффициентом преломления.

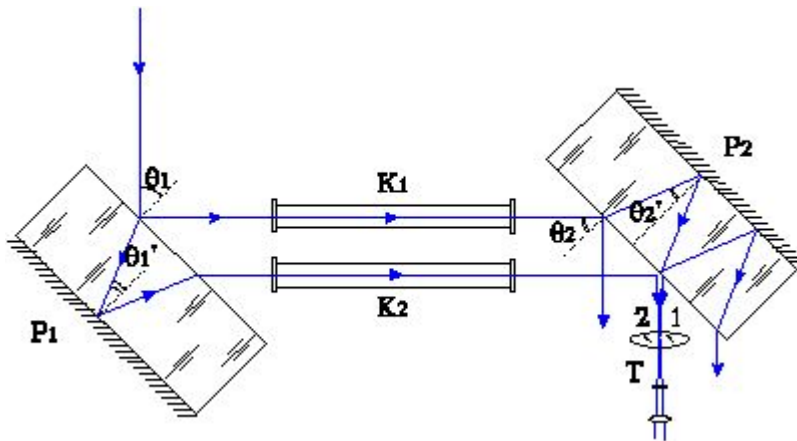
Для контроля асферических поверхностей в схему добавляют коррекционную линзу.

Интерферометр Жамена

- Интерферометр Жамена состоит из двух одинаковых толстых пластин P_1 и P_2 , изготовленных из весьма однородного стекла (или кварца для работы в ультрафиолетовой области спектра). Задние поверхности пластин посеребрены. Пучок света от протяженного источника падает под углом, близким к 45° , на одну из пластин. В результате отражения от передней и задней поверхностей пластины P_1 возникают два параллельных пучка, разделенных тем больше, чем толще пластина. Каждый из них в свою очередь раздваивается при отражении от двух поверхностей пластины P_2 . Средние пучки 1 и 2 налагаются и образуют интерференционную картину в фокальной плоскости зрительной трубы T . Разность хода между ними равна

$$\Delta = 2nh(\cos \theta_2' - \cos \theta_1') \approx 2nh \sin \theta' \cdot \delta \theta'$$

- Здесь h - толщина пластин; n - показатель преломления их материала; θ_1 и θ_2 - углы падения на поверхности пластин P_1 и P_2 ; θ_1' и θ_2' - соответствующие углы преломления. Если пластины строго параллельны, то $\theta_1 = \theta_2$ и $\Delta = 0$.



Интерферометр Жамена (вид сверху)

Поле зрения будет равномерно освещенным. При юстировке одну из пластин слегка наклоняют, поворачивая вокруг горизонтальной оси. При этом интерференционные полосы, наблюдаемые в установленную на бесконечность зрительную трубу, горизонтальны и эквидистантны.

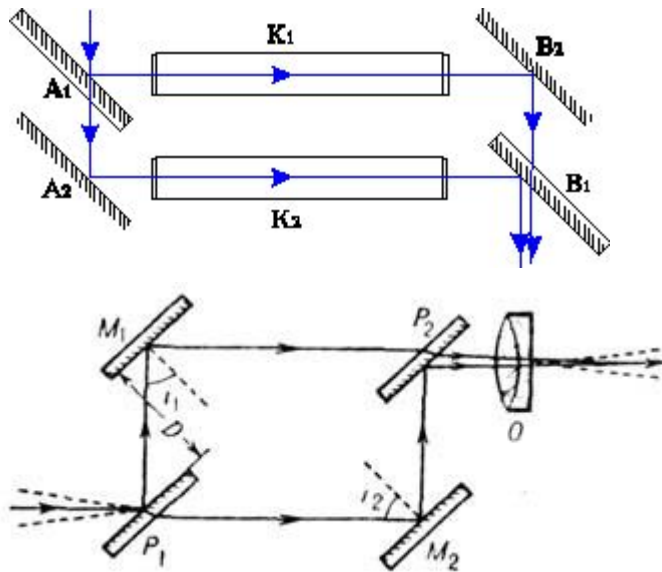
Они соответствуют низким порядкам интерференции и потому могут наблюдаться в белом свете.

Значительное разведение пучков между пластинами позволяет поместить на их пути кюветы K_1 и K_2 с исследуемыми веществами. При этом оптическая разность хода изменится на $(n_2 - n_1)l$, что вызовет смещение интерференционной картины.

По такому же принципу устроен интерферометр Рождественского.

Интерферометр Рождественского

- Роль делителей пучков - играют здесь полупрозрачные плоскопараллельные пластины A_1 и B_1 , а посеребренных наружных граней пластин - зеркала A_2 и B_2
- Это позволяет без использования толстых пластин значительно раздвинуть пучки света и ввести кюветы K_1 и K_2 , одна из которых окружена печью (для исследования паров металлов). Пластины A_1 , A_2 и B_1 , B_2 установлены попарно на общих основаниях строго параллельно. Блоки из A_1 , A_2 и B_1 , B_2 могут быть разнесены на значительное расстояние ($\sim 1\text{м}$).
- **Блоки наклонены относительно друг друга на небольшой угол** поворотом вокруг горизонтальной оси. Поэтому, как и в интерферометре Жамена, наблюдаются горизонтальные полосы равного наклона, соответствующие (при отсутствии кювет) низким порядкам интерференции.



На основе такого прибора Д.С. Рождественским в 1912 г. были выполнены классические исследования зависимости показателя преломления от длины волны вблизи линий поглощения, т.е. аномальной дисперсии (аномальная дисперсия - уменьшение показателя преломления с частотой, которое происходит в пределах ширины спектрального контура линии поглощения.) в парах металлов на основе метода, предложенного Пуччианти.

Схема интерферометра Рождественского

Интерферометр Маха-Цендера

- Схема, в которой зеркала M_1 и M_2 и светоделители P_1 и P_2 **плоскопараллельны**, называется интерферометром Маха-Цендера. Введение в одно из плеч интерферометра прозрачного объекта полосы изменят форму, наглядно показывая распределение показателя преломления в исследуемой среде.
- Интерферометр применяется при исследовании воздушных потоков (напр., при обтекании моделей самолётов), ударных волн при взрывах и т.п.

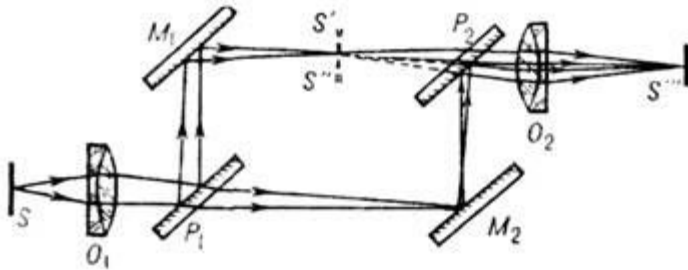
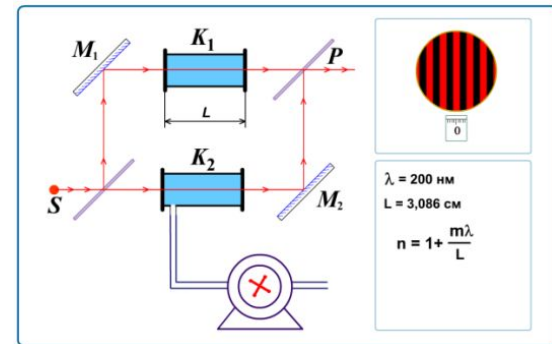


Схема интерферометра Маха-Цендера



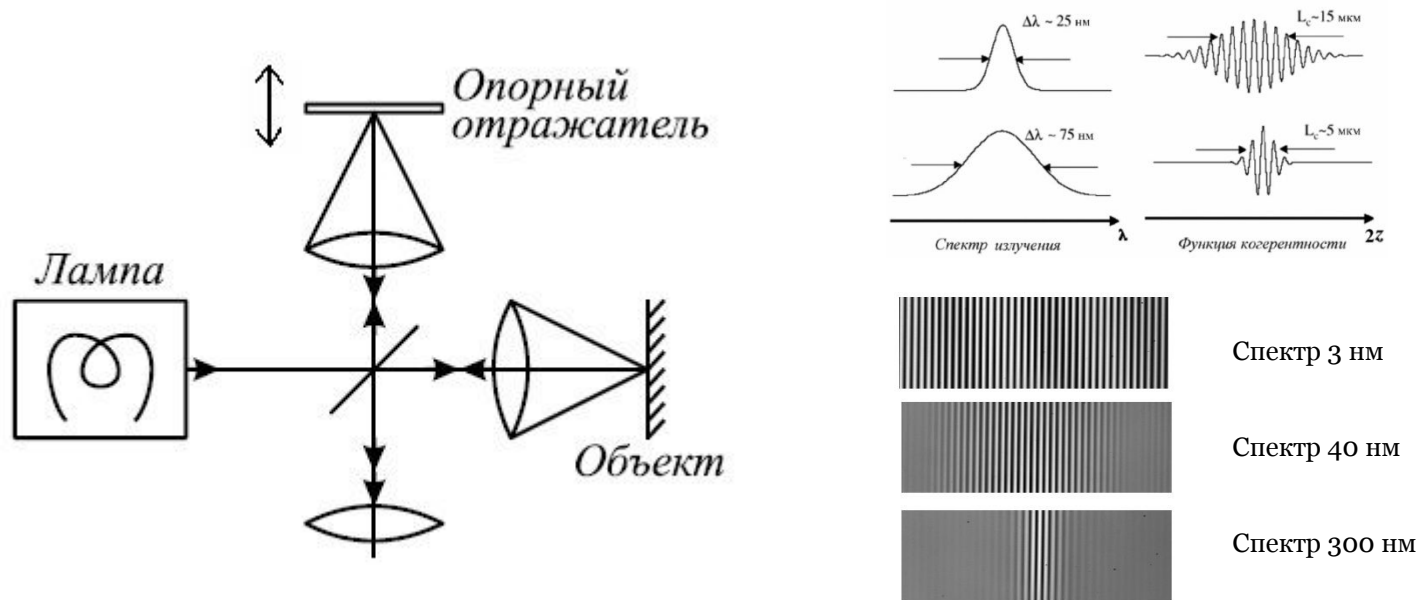
Опыт Физо/fla60.swf

Интерферометр Маха - Цендера может быть использован для измерения показателей преломления газов: $n = 1 + m\lambda/L$, где L - длина кюветы, а m - порядок интерференции

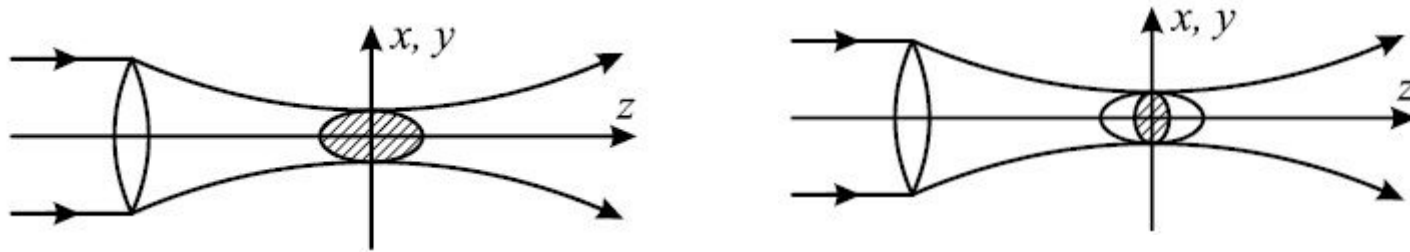
Интерферометрия в белом свете

- Интерферометры, основанные на когерентном освещении, наряду с высокой точностью измерений, имеют небольшой динамический диапазон.
- Динамический диапазон определяется областью фазовой однозначности в пределах которой можно восстановить разность фаз.
- Поэтому такие интерферометры, в основном, используются для измерения объектов с оптически чистой поверхностью.
- Оптические системы низкокогерентной интерферометрии или интерферометрии в белом свете (*white light interferometry* или *VSI - vertical scanning interferometers*) очень мощное средство оптического контроля. Такие системы можно использовать для контроля промышленных деталей (для объектов с шероховатой поверхностью).

- На рис. показана схема классического интерференционного микроскопа, в которой источником излучения являются галогенная или дуговая лампа и объективы имеют большую апертуру.
- Интерференционные полосы малой когерентности наблюдаются при равенстве оптических длин пути измерительной и опорной волн в пределах длины когерентности излучения. Положение опорного отражателя, при котором достигается максимум видности полос, характеризует расстояние до отражающей поверхности или границы внутреннего отражающего слоя среды.



- При фокусировке измерительного пучка локализуется область объекта, показанная на рис.

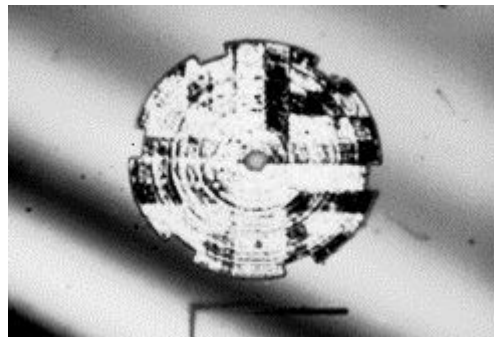


Локализация слоя среды при фокусировке (а) и использовании излучения малой когерентности (б)

- Размер этой области в поперечном сечении сфокусированного пучка определяется выражением $d_{xy} = 0,9\langle\lambda\rangle$, тогда как размер локализованной области по глубине фокусировки равен $d_z = 1,8\langle\lambda\rangle / A^2$.
- Если учесть выражение для средней длины когерентности $L_c \approx 0,44\langle\lambda\rangle^2 / \Delta\lambda$, получим

$$\frac{d_z}{L_c} \approx \frac{0,4\Delta\lambda}{A^2\langle\lambda\rangle}$$

- Хороший контраст полос получается только в том случае, если два пучка интерферометра точно согласованы.
- Если в одном их пучков интерференционного микроскопа разместить объект, а другой пучок менять, профиль объекта можно определить по позициям, в которых полосы имеют максимальный контраст.
- При этом отсутствует фазовая неоднозначность.



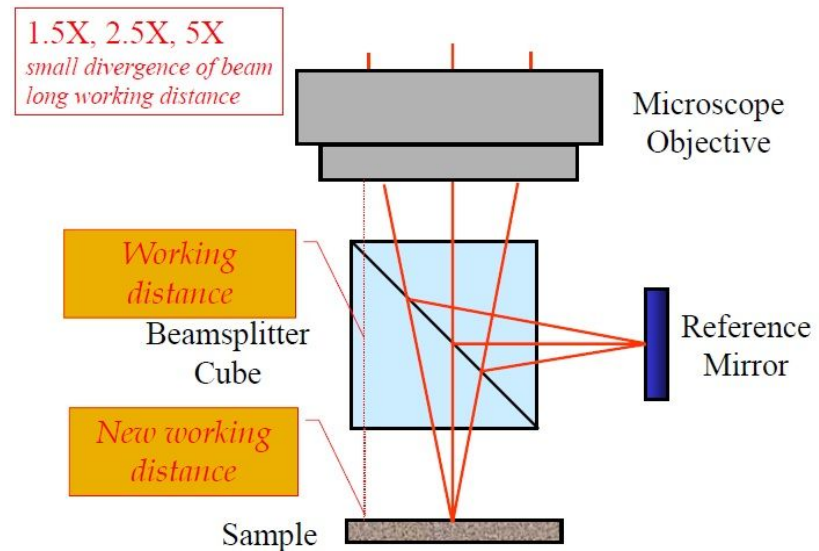
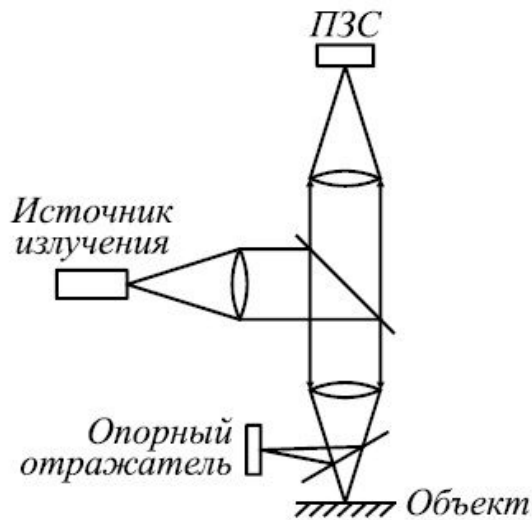
Главным недостатком этого типа интерферометров является то, что при одном измерении получается только одно сечение профиля.

Требуется большое число измерений и большое время для измерения объектов, которые имеют большую глубину профиля.

- Наиболее часто оптические схемы низкокогерентных интерферометров строятся на основе интерференционных микроскопов Линника, Майкельсона, Миро (в отечественной литературе эту схему принято называть интерферометром Захарьевского) и конфокального микроскопа.
- Обычно Миро-интерферометры используют при увеличении от 10 до 50х, интерферометры Майкельсона используют при низком увеличении, интерферометры Линника при большом увеличении, конфокальные микроскопы используют при большом увеличении от 50 до 150х.
- В качестве источника излучения обычно используют вольфрамовую галогенную лампу или светодиоды.

Интерференционный микроскоп Майкельсона

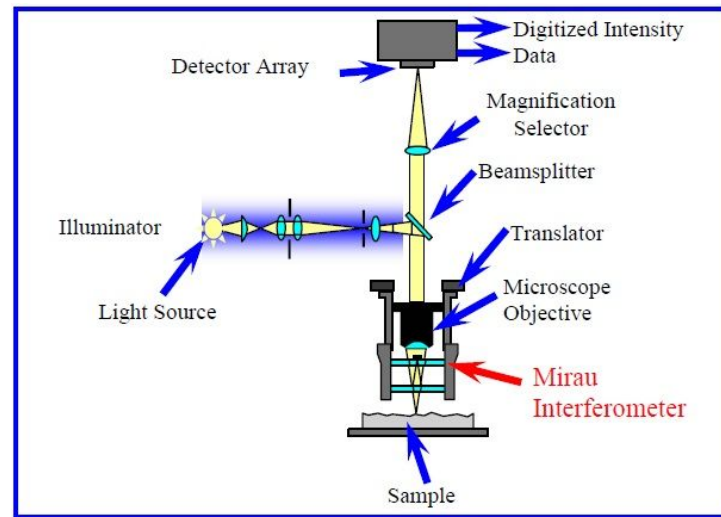
- Обычно интерферометры Майкельсона используют при низком увеличении - 1.5X, 2.5X, 5X.



Оптическая схема интерференционного микроскопа Майкельсона)

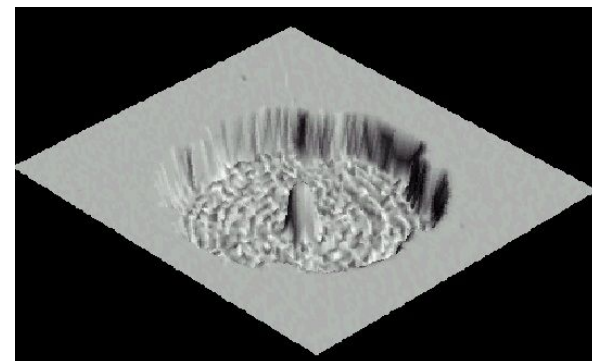
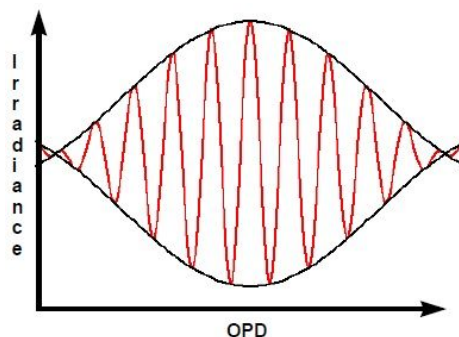
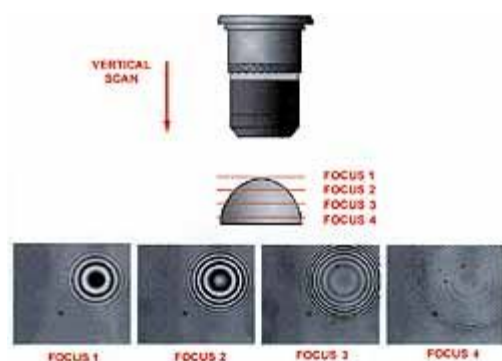
Интерференционный микроскоп Миро

- Миро-интерферометр перемещается или с помощью пьезокерамики или с помощью шаговых двигателей. В процессе движения расстояние от линзы до опорной поверхности остается фиксированным. Фазовый сдвиг вносится только в одно плечо интерферометра. Таким образом полосы можно интерпретировать как интерферометрию с фазовым сдвигом (phase-shifting interferometry) или вертикально сканирующую интерферометрию с выделением пика когерентности (vertical scanning coherence peak sensing interferometry or white light scanning interferometry).



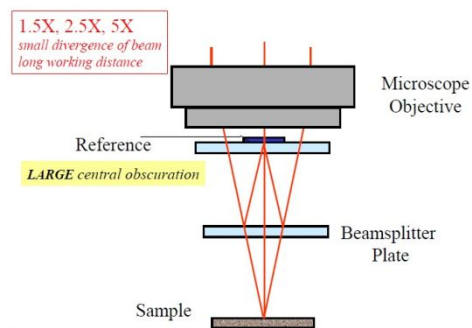
Оптическая схема интерференционного микроскопа Миро (Захарьевского)

- Для определения пика сигнал вводится в компьютер.
- Шаг перемещения интерферометра имеет фиксированный размер (Например 80 или 240 нм).



Интенсивность при перемещении объекта через точку фокуса. Можно заметить, что сигнал выглядит подобно амплитудной модуляции информационного сигнала. Производится низкочастотная фильтрация. Определив пик, тем самым находят величину профиля по z-координате.

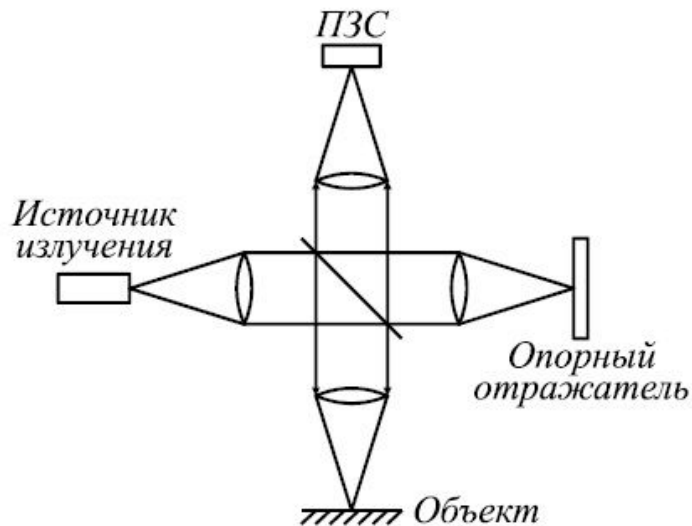
К недостаткам интерферометра можно отнести то, что обычно требуется специальный объектив Миро, который стоит достаточно дорого. Опорное зеркало напыляется прямо на зеркало объектива.



Объектив Миро

Интерференционный микроскоп Линника

- Микроинтерферометр Линника по своей схеме представляет собой интерферометр Майкельсона, перед зеркалами которого установлены идентичные друг другу микрообъективы, сфокусированные на поверхность этих зеркал. Роль одного из зеркал играет поверхность исследуемого объекта, содержащая микронеровности.

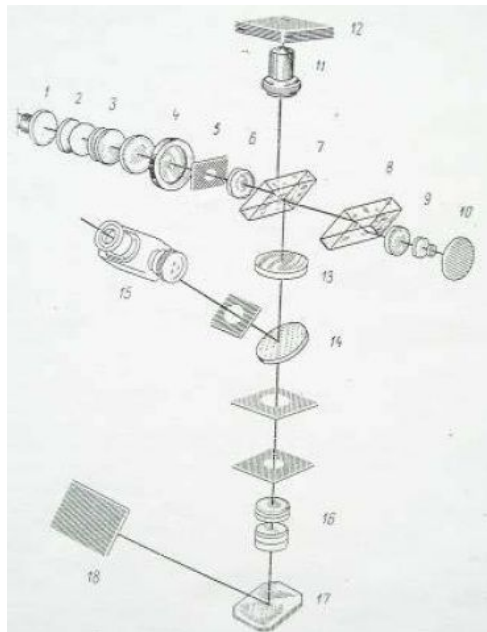


Оптическая схема интерференционного микроскопа Линника)

Источником излучения служит лампа накаливания.

В схеме Линника требуются идентичные микрообъективы и их точная юстировка.

- Изготовление такой оптической схемы достаточно сложное дело. На следующем рисунке приведены оптическая схема и вид интерферометра МИИ 4 ЛОМО, разработанный в 30 годы академиком Линником.



Пучок лучей от источника света 1 (лампа накаливания) направляется конденсором 2 через светофильтр 3 (Светофильтр 3 применяется, для наблюдения интерференционной картины в монохроматическом свете. При наблюдении в белом свете светофильтр выключается.) в плоскость апертурной диафрагмы 4. В фокальной плоскости проекционного объектива 6 помещена полевая диафрагма 5. Параллельный пучок лучей по выходе из объектива 6 падает на полупрозрачную разделительную пластинку 7. Отраженная часть пучка лучей от пластинки 7, (первая ветвь интерферометра), собирается в фокальной плоскости объектива 11, на проверяемой пластинку 12 и собирается в фокусе объектива 13. Зеркало 14 направляет пучки лучей в окуляр 15 визирного тубуса, при помощи которого наблюдается изображение проверяемой поверхности.

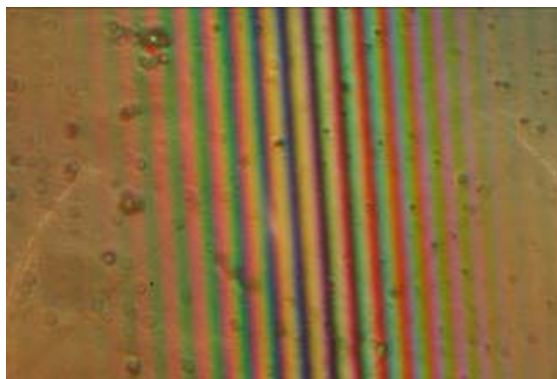
Прошедшая часть пучка лучей (вторая ветвь микроинтерферометра) через пластинку 7 падает на компенсатор 8 и собирается в фокусе объектива 9. После отражения от эталонного зеркала 10 пучок лучей снова проходит через объектив 9, компенсатор 8 и падает на пластинку 7, которая одну часть лучей также пропускает, а другую отражает. Компенсатор 8 служит для компенсации хода лучей в пластинке 7, образуемой первой ветвью интерферометра. Первая часть лучей в дальнейшем не участвует в образовании изображения, вторая же часть интерферирует с лучами другой ветви интерферометра, образует изображение интерференционных полос в бесконечности, передаваемое объективом 13 в фокальную плоскость окуляра 15.

Таким образом, в фокальной плоскости окуляра можно одновременно наблюдать изображение интерференционных полос и изображение проверяемой поверхности.

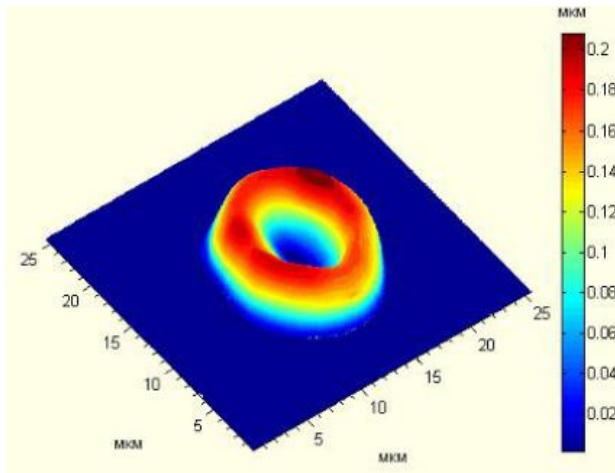
Ветвь, идущая через элементы 14 – 16 – 17 – 18 предназначена для фотографирования интерферограмм.

Для измерения более мелких неровностей поверхности (менее 3 мкм) Владимир Павлович Линник разработал свой знаменитый микроинтерферометр, представляющий собой небольшую насадку, ввинчивающуюся в тубус микроскопа вместо объектива. Пучки интерферируются, и мы видим в поле зрения окуляра объект, на поверхность которого накладываются интерференционные полосы. Если поверхность неровная, то полосы искривляются, повторяя собой извилины поверхности, т. е. воспроизводя ее профиль.

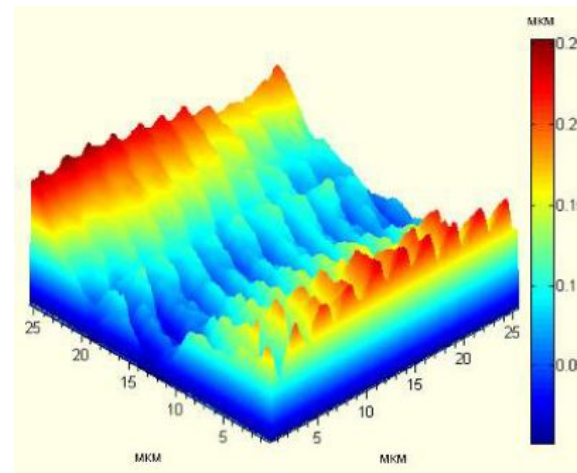
- Описанный прибор позволяет наблюдать качественную интерференционную картину в свете полихроматического источника. Осветительная часть смонтирована в едином корпусе с прибором. На рис. приведены общий вид прибора (МИИ 4 ЛОМО) и полученная с его помощью картина интерференции в белом свете.



Применение автоматизированного интерференционного микроскопа Линника



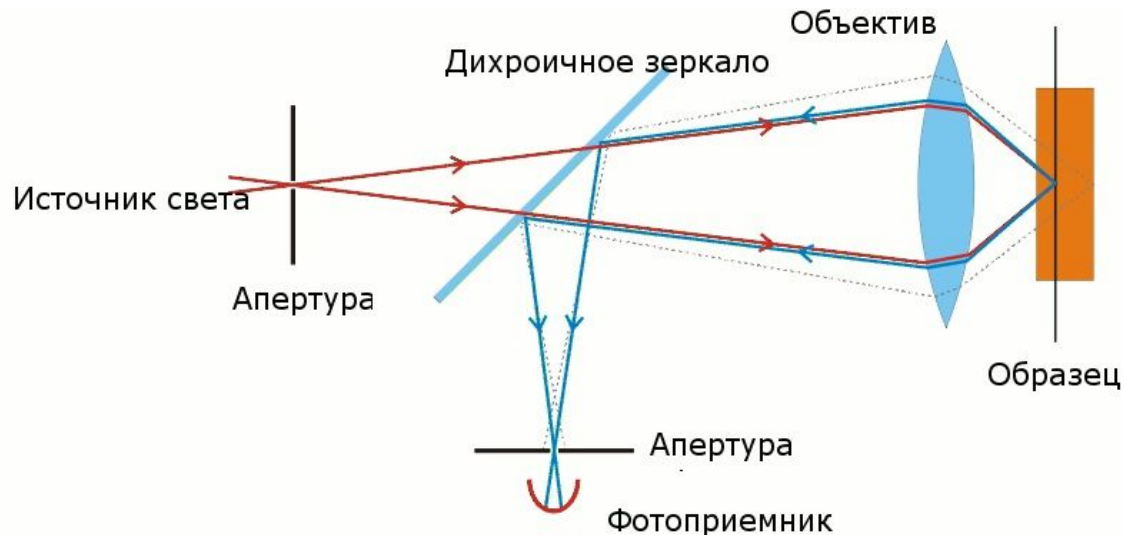
Эритроцит
Поле зрения 25Х25 мкм



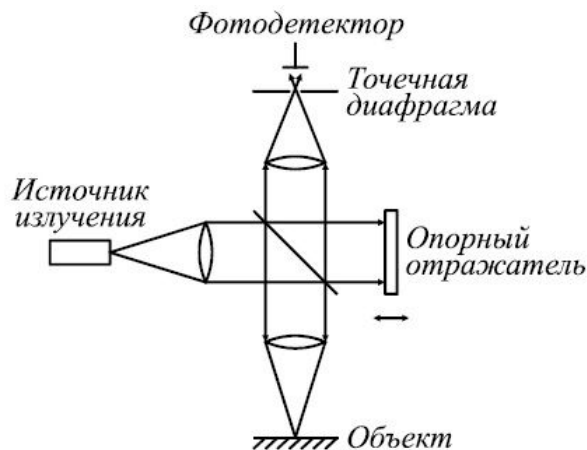
Мышечное волокно
Поле зрения 25Х25 мкм

Конфокальный микроскоп

- Впервые концепция построения конфокального микроскопа была разработана в середине 1950-х гг. аспирантом Гарвардского университета Марвином Мински (Marvin Minsky). Но широкий интерес к этой области проявился лишь в 1980-х гг., благодаря бурному развитию компьютерной и лазерной технологий.
- **Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия** (Confocal Laser Scanning Microscopy - CLSM) – разновидность оптической микроскопии, в которой сфокусированный лазерный луч сканирует изучаемую область по осям X и Y, формируя таким образом растр изображения. Отраженный свет улавливается фотоэлектрическим умножителем (ФЭУ) и демонстрируется на экране монитора в виде растра. Свет, излучаемый участками вне фокальной плоскости блокируется апертурой микродиафрагмы, расположенной конфокально с образцом. Эта методика позволяет выполнять тонкие оптические сечения образца вдоль оси Z.



- Конфокальный микроскоп отличается от "классического" оптического микроскопа тем, что в каждый момент времени регистрируется изображение одной точки объекта, а полноценное изображение строится путем сканирования (движения образца или оптической системы).
- **Интерферометр на основе конфокального микроскопа** показан на следующем рис. В оптическую схему добавлен опорный отражатель (зеркало на пьезокерамике). Перемещением этого зеркала находится максимум при котором длины опорных пучков будут одинаковы.



В конфокальном микроскопе требуется сканирование объекта «от точки к точке», при этом достоинством конфокальной селекции отраженных лучей с помощью точечной диафрагмы является нечувствительность к искажениям опорного волнового фронта, в отличие от схемы Линника, в которой требуются идентичные микрообъективы и их точная юстировка.

- Преимущества оптической интерферометрии - высокая разрешающая способность по Z координате, не зависящая от коэффициента увеличения. Такие интерферометры очень хорошо работают при низких коэффициентах увеличения.
- Конфокальные системы чувствительны к NA (numerical aperture - цифровая апертура), но имеют то преимущество, что могут использовать высокочисловые апертуры и таким образом способны профилировать резкие изменения наклона. Для NA больше чем 0.8, разрешающая способность по Z лучше чем 2 нм, сопоставима с низкокогерентной интерферометрией (white light Interferometry).

