

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Справ.

ОПТИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 26 (86)

МАШГИЗ • 1955



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР и ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 26 (86)

*Под редакцией
профессора доктора технических наук М. Ф. РОМАНОВОЙ*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1955 ЛЕНИНГРАД

7111111111

В сборнике помещены статьи, посвященные вопросам применения оптических методов к измерению различных физических величин.

Сборник может представить интерес для научных сотрудников, инженерно-технических работников, специалистов в области оптики, линейных измерений, спектроскопии и геодезии.

Ответственный редактор директор ВНИИМ канд. техн. наук *М. Ф. Юдин*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Редакция литературы по конструированию
и эксплуатации машин
Заведующий редакцией инж. *Ф. И. Фетисов*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий сборник содержит ряд статей, посвященных актуальным вопросам применения оптических методов для решения метрологических задач.

В статье Н. Р. Батарчуковой, А. И. Карташева и М. Ф. Романовой дано описание вновь изготовленных ламп, заполненных четными изотопами кадмия, и приведены результаты определения значений и исследования воспроизводимости длины волны красной линии кадмия в излучении этих ламп.

Исследование показало, что целесообразно принять длину волны красной линии изотопа Cd^{114} , вместо естественного кадмия, в качестве основной длины световой волны, определяющей длину светового метра.

В статье А. И. Карташева предложен оригинальный метод измерения основной физической константы — скорости распространения света, — основанный на применении интерференционного модулятора. Впервые в СССР получено значение скорости света на основании экспериментов, выполненных автором в лабораторных условиях. Результат этой работы особенно важен в настоящее время в связи с установлением нового, наиболее вероятного значения скорости распространения света.

Статья М. Л. Бржезинского посвящена описанию нового интерференционного компаратора, позволяющего измерять штриховые и концевые меры длиной до 1000 мм в длинах световых волн, а также производить сравнение длин штриховых и концевых мер.

В статье Е. А. Волковой, А. И. Карташева, М. Ф. Романовой и В. С. Степанова приведена принципиальная схема и изложены конструктивные особенности нового универсального интерферометра системы ВНИИМ, дающего возможность обеспечить проверку исходных концевых мер и геодезических кварцевых жезлов длиной до 1200 мм.

Статья Е. А. Волковой и И. П. Владимирова содержит описание тонких экспериментальных работ по юстировке и исследованию универсального интерферометра системы ВНИИМ.

В статье Н. Р. Батарчуковой и И. П. Владимирова отражен опыт оптической лаборатории ВНИИМ по созданию интерференционных эталонов типа Фабри и Перо, широко применяемых при спектроскопических исследованиях и интерференционных измерениях длины, а также дан краткий обзор существующих конструкций этих эталонов.

Вторая статья А. И. Карташева знакомит читателя с принципом действия нового предложенного автором прибора для контроля чистоты поверхности. Этот достаточно простой прибор, основанный на особенностях отражения света от металлических поверхностей, позволяет одновременно производить качественную и количественную оценку микрогеометрии поверхности и может найти широкое применение в производственных условиях.

В статье Г. И. Стракуна и А. Л. Курицкого дано описание новой фотографической камеры с зеркально-линзовым объективом, имеющим весьма малые aberrации, а также изложены методы изготовления несимметричных линз и юстировки прибора.

Камера предназначена для точного фотографирования интерференционной картины.

В статье В. А. Коридорф и И. Н. Черного приведено описание конструкции прибора и даны краткие сведения по исследованию прибора для измерения цветовой температуры источников света непосредственно в сенситометрах. Применение такого прибора позволит повысить достоверность результатов сенситометрических измерений.

Редактор

Н. Р. БАТАРЧУКОВА, А. И. КАРТАШЕВ и М. Ф. РОМАНОВА

КАДМИЕВЫЕ ОДНОИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА¹

От основной спектральной линии прежде всего требуется высокая точность воспроизведения ее длины волны и расширение предела видимости интерференционной картины.

Очевидно, точность воспроизведения длины волны простых линий должна быть выше, чем линий, обладающих сверхтонкой структурой.

Для исследования был намечен ряд элементов, в излучении четных изотопов которых следует искать эту простую линию. К этим элементам относятся кадмий, ртуть, криптон, ксенон и свинец.

Расширение предела видимости интерференционной картины зависит, главным образом, от специальных условий возбуждения уже выбранной линии. Если длина волны спектральной линии хорошо воспроизводится в любых источниках, ее излучающих, то увеличение предела когерентности связано лишь со специальной конструкцией источника света.

В настоящее время основной спектральной линией в интерферометрии является красная линия естественного кадмия. Точность воспроизведения длины волны этой линии достаточно высока. Естественно предполагать, что она будет еще выше, если красная линия будет излучаться одним из четных стабильных изотопов кадмия. Поэтому в числе намеченных нами для исследования простых излучений одним из первых стоит излучение четных стабильных изотопов кадмия.

Целью настоящей работы явилось исследование излучения трех четных стабильных изотопов кадмия с точки зрения возможности выбора красной линии изотопического кадмия в качестве новой более монохроматичной линии.

1. Изготовление источников света

Для изготовления источников света, заполненных четными стабильными изотопами кадмия (Cd^{112} , Cd^{114} и Cd^{116}), были использованы небольшие количества окиси этих трех изотопов ($Cd^{112}O$, $Cd^{114}O$, $Cd^{116}O$). Прежде чем перейти к восстановлению изотопического кадмия из окиси, был поставлен опыт по восстановлению малых количеств окиси естественного кадмия CdO .

Около 30 мг окиси естественного кадмия заключали в ампулу с двумя отводами. Средний отвод ампулы припаивали к вакуумной системе, а крайний — к лампе.

На рис. 1 изображены заготовка 1 (лампы вместе с ампулой) и лампа 2 в процессе откачки.

Окись кадмия, находящуюся в ампуле, подогревали в атмосфере водорода при давлении 20—30 мм рт. ст. При подогреве ампулы до $400^{\circ}C$ наступало частичное восстановление окиси. Восстановившийся металлический

¹ Краткое изложение содержания работы см. ДАН, ХС, № 2, стр. 53, 1953.

кадмий в виде пара перегонялся в лампу и осаждался на ее холодных стенках. Чтобы восстановить достаточное для заполнения лампы количество металлического кадмия приходилось несколько раз производить откачку ампулы и лампы и наполнение их сухим водородом. После этого в оставших ампуле и лампе достигали разрежения до 10^{-5} мм рт. ст., заполняли их водородом или аргоном до давления 0,1—5 мм рт. ст. и отпайвали лампу. Присутствие постороннего газа в лампе (аргона или водорода) при заполнении ее малым

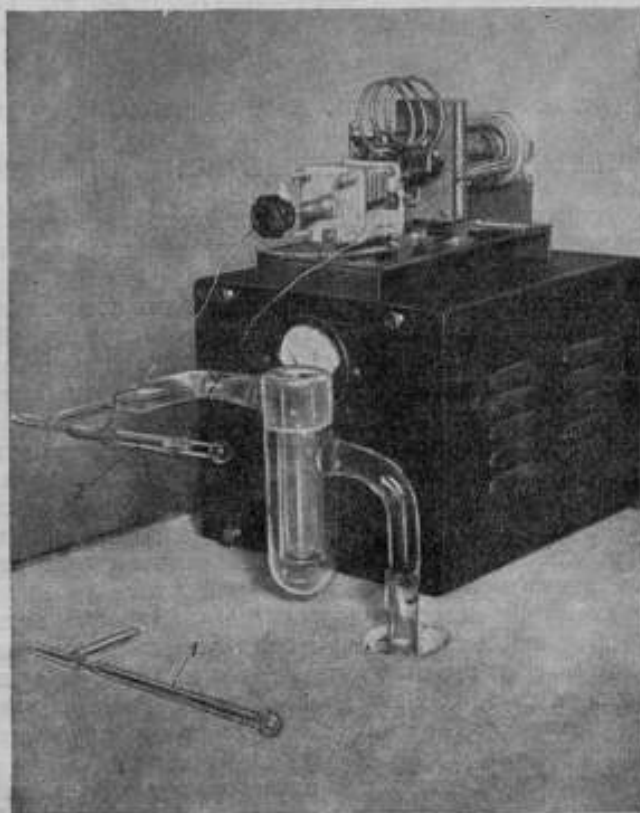


Рис. 1.

количеством исследуемого вещества необходимо для обеспечения возбуждения и поддержания разряда в лампе. Для заполнения 4—5 ламп, дающих вполне удовлетворительное по яркости свечение при возбуждении их генератором частоты (60—70 Мгц), оказалось вполне достаточно 30 мг окиси.

Разработав, таким образом, технологию заполнения ламп металлическим кадмием, восстановленным из окиси, приступили к изготовлению безэлектродных ламп с изотопическим кадмием. Во избежание смешения изотопов, для каждого из них была изготовлена своя ампула с достаточно длинным средним отводом. После отпайки лампы, при переходе к заполнению ламп другим изотопом, вместе с ампулой срезали и ее длинный средний отвод. Всего было изготовлено 10 ламп. Из них пять было заполнено Cd^{114} , три — Cd^{116} одна — Cd^{113} и одна — естественным кадмием.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики ламп.

Как известно, упругость паров кадмия оказывается достаточной для возбуждения видимого спектра кадмия лишь при нагревании лампы до $300^{\circ}C$. Для этого была рассчитана и изготовлена печь с окном для наблюде-

ния и с выводами для подведения к лампе высокочастотного напряжения. Температура внутри печи контролировалась посредством термпары (хромель — копель) и регулировалась реостатом, включенным в цепь нагревательной обмотки печи. При достижении внутри печи температуры 300°C можно

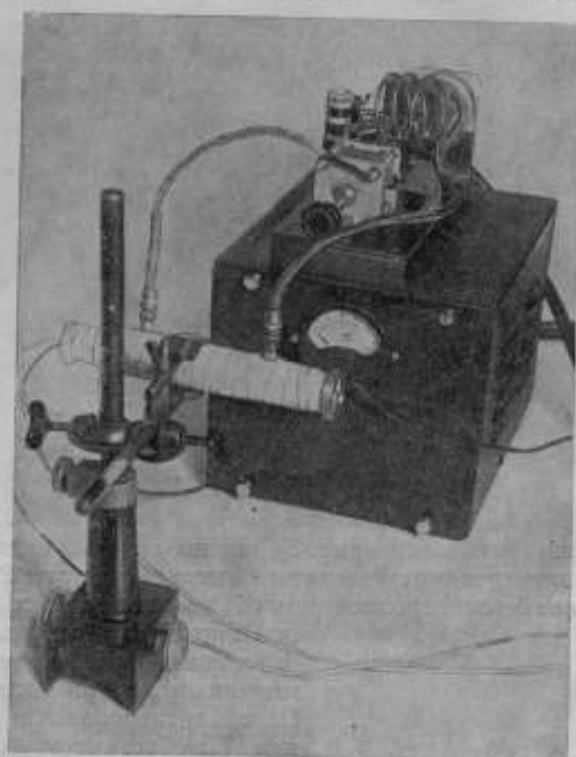


Рис. 2.

было легко возбудить в лампе высокочастотным генератором яркий спектр кадмия. Внешний вид печи (с находящейся внутри лампой) и высокочастотного генератора представлен на рис. 2.

Таблица 1

№ лампы	Диаметр трубки в мм	Длина трубки в мм	Вещество, заполняющее лампу	Добавленный газ	Давление газа в мм рт. ст.
1	7	145	Cd (естественный)	H	0,3
2	7	115	Cd ¹¹⁴	•	5
3	7	147	•	•	0,3
4	7	130	•	•	1
5	7	140	•	•	0,2
6	7	140	•	Ar	0,2
7	7	145	Cd ¹¹⁶	H	4
8	7	130	•	•	3
9	7	150	•	Ar	0,1
10	7	140	Cd ¹¹²	H	1

Исследование излучения безэлектродных ламп, заполненных изотопами кадмия

Исследование излучения ламп осуществлялось на установке, собранной для исследования источников света.

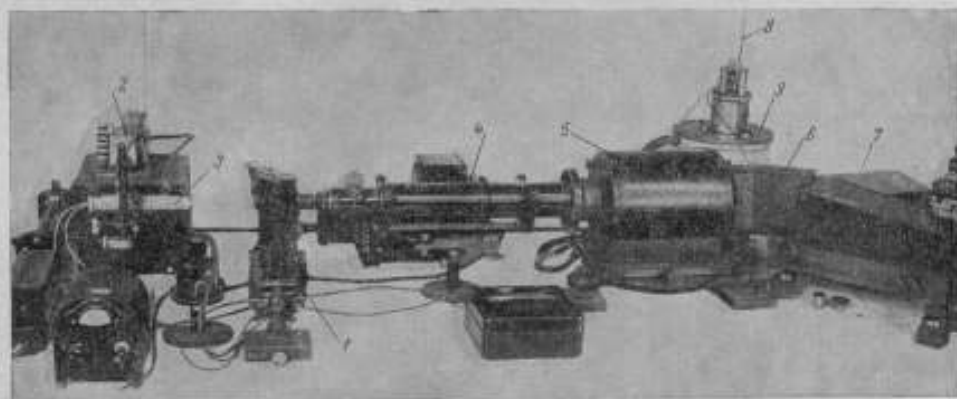


Рис. 3.

На фотографии установки (рис. 3), можно видеть: кадмиевую лампу 1 с накаливаемыми электродами, генератор высокой частоты 2, печь 3 с помещенной внутри нее безэлектродной лампой, коллиматор 4 со щелью переменной ширины и объективом с фокусным расстоянием 550 мм, термостат 5 с помещенным внутри эталоном Фабри и Перо, дисперсионную призму 6, камеру 7 с объективом, фокусное расстояние которого равно 350 мм, и передвижной кассетой, calorиметрический термометр 8 в специальном сосуде с двойными стенками 9, между которыми циркулирует вода при той же температуре, что и в полости между стенками термостата 5, подаваемая из ультра-термостата.

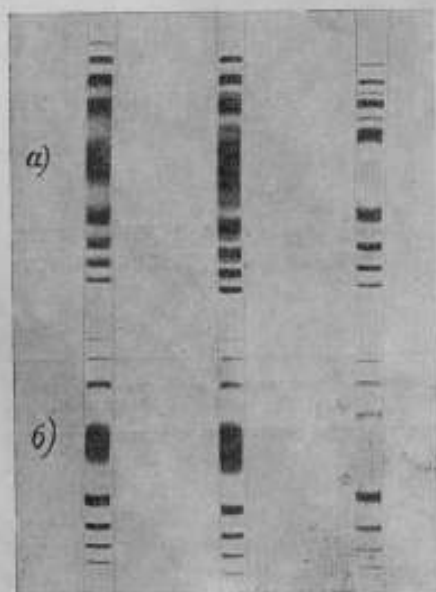


Рис. 4.

Спектрограмма (рис. 4), воспроизводящая зеленые и фиолетовые линии кадмия, снята двухпризменным спектрографом (рис. 5) с интерференционным эталоном толщиной $d = 20$ мм. Спектрограмма показывает, что в линиях естественного кадмия (а) наблюдается сверхтонкая структура; она отсутствует в линиях (б), излучаемых четными изотопами Cd^{114} .

На интерференционном компараторе была проверена видимость интерференционных полос в линиях кадмия: $\lambda_1 = 0,6438$ мк, $\lambda_2 = 0,5154$ мк, $\lambda_3 = 0,5086$ мк, $\lambda_4 = 0,4800$ мк, $\lambda_5 = 0,4678$ мк, излучаемых безэлектродной лампой, заполненной одним из изотопов. Было установлено, что на интерференционном компараторе можно производить измерение плоскопараллельных концевых мер длиной до 200 мм в свете трех линий изотопического

кадмия $\lambda_1 = 0,643 \text{ мк}$, $\lambda_2 = 0,515 \text{ мк}$, $\lambda_4 = 0,480 \text{ мк}$, тогда как в линиях естественного криптона (в обычных условиях) можно измерить меры длиной лишь до 150 мм. Что касается красной линии изотопического кадмия, то в ней интерференция еще видна при установке на компаратор меры в 250 мм.

При практических интерференционных измерениях длины спектр четных изотопов кадмия (с его широко расставленными и легко разрешаемыми линиями) удобен для отыскания порядка интерференции методом совпадения

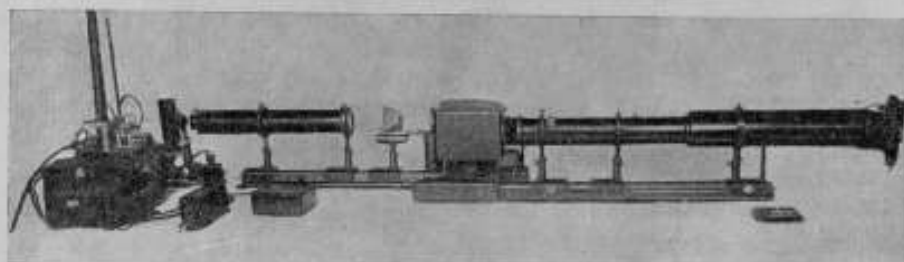


Рис. 5.

дробных частей. Поэтому созданный нами источник света с простыми кадмиевыми линиями может быть с успехом применен при поверках на интерференционном компараторе плоскопараллельных концевых мер длиной до 200 мм.

3. Воспроизводимость длины волны красной линии изотопического кадмия

Изучение спектральных линий с точки зрения выбора одной из них в качестве основной заключается в исследовании воспроизводимости значений длин волн этих линий при различных разностях хода в интерферометре и выяснении причин, вызывающих расширение спектральной линии в рассматриваемых источниках света.

При исследовании воспроизводимости длины волны красной линии изотопического кадмия был применен эталон Фабри и Перо с пятью сменными кварцевыми кольцами.

На установке для изучения источников света (рис. 3) получено 10 фотографий интерференционных спектрограмм для пяти разностей хода в интерферометре. Фотографирование спектра безэлектродных ламп производили последовательно друг за другом, причем до и после фотосъемки спектра каждой лампы фотографировали спектр лампы с накалированными электродами. Красная линия естественного кадмия, излучаемая лампой с накалированными электродами, принималась в качестве основной.

Фотографирование спектрограмм производилось на пластинки изопанхром чувствительностью 60 ед. ГОСТ. Экспозиция для спектра лампы с накалированными электродами достигала всего лишь 1 сек., а для спектров безэлектродных ламп — от 10 сек. до нескольких минут.

В самом начале исследования вышли из строя лампы 7 и 4, в конце — лампа 9. Повидимому, это объясняется постепенным поглощением кадмия стеклом трубки при недостаточном запасе кадмия в лампе. В остальных семи лампах яркость линий кадмия не изменилась и после окончания исследования.

На полученных спектрограммах были произведены измерения диаметров колец равного наклона в свете красной линии изотопического и естественного кадмия. Эти измерения производились тремя наблюдателями на измерительном микроскопе и на компараторе ИЗА-2. По диаметрам пяти колец равного

Таблица 2

z_d	r_1	r_2	$r_2 - r_1$	Δz
Лампа 1 (Cd естественный)				
93,880	0,044	0,031	-0,013	+0,0006
93,880	0,753	0,759	+0,006	-0,0003
93,880	0,751	0,752	+0,001	-0,00004
158,060	0,061	0,053	-0,008	+0,0002
200,000	0,112	0,116	+0,004	-0,00008
Лампа 2 (Cd ¹¹⁴)				
32,958	0,250	0,268	+0,018	-0,0023
60,576	0,826	0,850	+0,024	-0,0016
93,880	0,724	0,745	+0,021	-0,0009
158,060	0,101	0,138	+0,037	-0,0009
200,000	0,122	0,203	+0,081	-0,0017
Лампа 3 (Cd ¹¹⁴)				
32,958	0,247	0,270	+0,023	-0,0030
60,576	0,826	0,849	+0,023	-0,0016
93,880	0,709	0,756	+0,047	-0,0021
158,060	0,101	0,174	+0,073	-0,0018
200,000	0,108	0,213	+0,105	-0,0022
Лампа 5 (Cd ¹¹⁴)				
32,958	0,237	0,256	+0,019	-0,0025
60,576	0,844	0,872	+0,028	-0,0019
93,880	0,732	0,782	+0,050	-0,0022
158,060	0,055	0,142	+0,087	-0,0022
200,000	0,019	0,112	+0,093	-0,0019
Лампа 6 (Cd ¹¹⁴)				
32,958	0,298	0,314	+0,016	-0,0021
60,576	0,858	0,894	+0,036	-0,0025
93,880	0,725	0,768	+0,043	-0,0019
158,060	0,041	0,091	+0,050	-0,0013
200,000	0,040	0,119	+0,079	-0,0016
Лампа 8 (Cd ¹¹⁶)				
32,958	0,292	0,310	+0,018	-0,0023
60,576	0,865	0,899	+0,034	-0,0023
93,880	0,004	0,040	+0,036	-0,0016
158,060	0,041	0,117	+0,076	-0,0019
200,000	0,048	0,130	+0,082	-0,0017
Лампа 9 (Cd ¹¹⁶)				
32,958	0,292	0,318	+0,026	-0,0034
60,576	0,865	0,904	+0,039	-0,0027
93,880	0,004	0,077	+0,073	-0,0034
158,060	0,055	0,180	+0,125	-0,0032
Лампа 10 (Cd ¹¹²)				
32,958	0,292	0,293	+0,001	-0,0001
60,576	0,832	0,837	+0,005	-0,0003
93,880	0,958	0,975	+0,017	-0,0008
158,060	0,071	0,057	+0,014	-0,0004
200,000	0,089	0,054	+0,035	-0,0007

наклона подсчитывали дробные части порядка интерференции для каждой из пяти разностей хода в интерферометре. В табл. 2 приведены значения дробных частей порядка интерференции ε_2 для красной линии, излучаемой безэлектродными лампами, дробных частей порядка интерференции ε_1 для красной линии кадмия, излучаемой лампой с накаливаемыми электродами, разности порядков интерференции $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ в долях полосы, разности длин волн $\Delta\lambda$ в ангстремах и значения разностей хода $2d$ в миллиметрах.

Так как спектр лампы с накаливаемыми электродами снимали до и после спектра соответствующей безэлектродной лампы, то дробную часть ε_1 для красной линии этой лампы брали как среднее из двух значений. Значения $\Delta\lambda$, вычислены по разностям дробных частей $\Delta P = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$, где ε_2 соответствует наблюдаемой дробной части для исследуемой лампы, а ε_1 — для лампы с накаливаемыми электродами, причем

$$\Delta\lambda = -\frac{\Delta P \lambda^2}{2d},$$

где d — толщина интерференционного эталона.

На основании данных табл. 2 построен график зависимости смещения интерференционных полос $\Delta P = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$, выраженного в долях порядка интерференции, от разностей хода (рис. 6). По оси абсцисс отложена разность хода в интерферометре в миллиметрах, а по оси ординат — смещение интерференционных полос ΔP линий изотопов по отношению к красной линии естественного кадмия.

На графике нанесены точки, соответствующие лампам, заполненным различными изотопами при малых давлениях (0,3 мм рт. ст.) постороннего газа. Все точки хорошо укладываются на прямые, что указывает на высокую воспроизводимость длин волн изотопического кадмия и на высокую точность их сравнения. Среднее квадратичное отклонение в долях порядка интерференции для всех ламп составляет $\sigma_{\Delta P} = \pm 0,008$ полосы, а максимальное отклонение всего лишь в одном случае равно 0,025 полосы.

Из графика видно, что длины волн изотопов кадмия смещены друг относительно друга на одну и ту же величину, равную 0,0013Å. Длина волны самого тяжелого изотопа, как и следовало ожидать, смещается относительно центра тяжести линии естественного кадмия на самую большую величину в фиолетовую сторону. Естественно, что если тяжелый элемент имеет несколько изотопов с одинаковыми разностями массовых номеров, то его линии как правило, состоят из соответствующего числа эквидистантных компонент. Это теоретическое положение подтверждается нашими измерениями для трех четных изотопов кадмия. Каждый из исследуемых трех четных изотопов кадмия отличается по массе на 2 единицы ($\text{Cd}^{112} - \text{Cd}^{114} - \text{Cd}^{116}$) и компоненты красной линии, соответствующие этим изотопам, располагаются на расстоянии 0,0013Å друг от друга.

В литературе [1] имеется указание на то, что центр тяжести сложной красной линии естественного кадмия, излучаемой безэлектродной лампой (лампой АМИ), смещается. Чтобы проверить, не вызывается ли смещение длин волн красной линии изотопического кадмия условиями возбуждения, нами были проведены сравнения длины волны красной линии естественного кадмия, излучаемого безэлектродной лампой при возбуждении высокой частотой 75 Мгц, с длиной волны красной же линии, излучаемой лампой с накаливаемыми электродами. Оказалось, что эти длины волн в точности совпадают. На графике (рис. 6) точки для лампы 1 располагаются вдоль прямой, соответствующей значению эффективной длины волны красной линии естественного кадмия.

Таким образом, можно считать, что условия возбуждения в наших лампах не могут вызвать смещения максимума красной линии изотопического кадмия. Наблюдавшиеся смещения действительно являются изотопическими

и подтверждают наличие сверхтонкой структуры у красной линии кадмия, впервые наблюдаемые в 1933 г. М. Романовой и А. Ферхмин [2].

На основании полученных данных, подтверждающих справедливость теоретического положения об эквидистантном расположении компонент красной линии кадмия, отвечающих всем четным изотопам, а также известного процентного содержания изотопов в естественной смеси, был построен

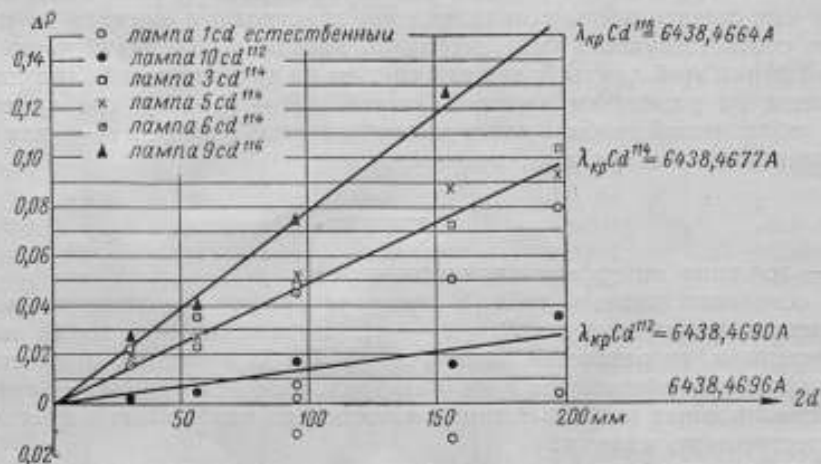


Рис. 6.

контур красной линии естественного кадмия, представленный на рис. 7. Сплошными тонкими линиями изображены контуры простых линий исследованных нами трех изотопов Cd^{112} , Cd^{114} и Cd^{116} , пунктирными — контуры

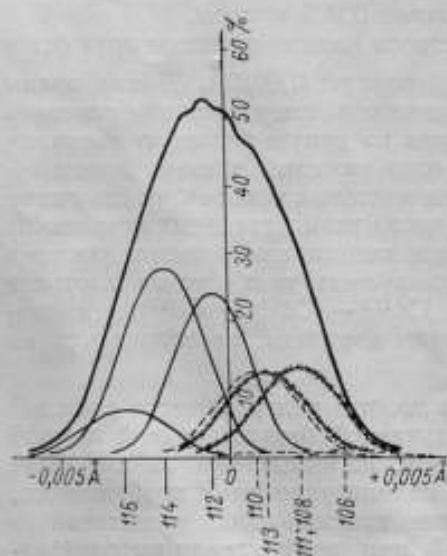


Рис. 7.

простых линий изотопов Cd^{106} , Cd^{108} и Cd^{110} , а пунктирными с крестиками — предположительно построенные контуры нечетных изотопов Cd^{111} и Cd^{113} . Полученный контур по своему строению достаточно хорошо согласуется с экспериментальными контурами, приводимыми различными авторами [2, 3].

В табл. 3 приведены значения длин волн красной линии кадмия для трех изотопов Cd^{112} , Cd^{114} и Cd^{116} при различных разностях хода, а также средние взвешенные значения длин волн и средние квадратичные погрешности ряда и результата измерений.

При вычислении среднего взвешенного значения длины волны предполагали вес пропорциональным разности хода. Величина средней квадратичной погрешности результата определяет точность воспроизведения длины волн. Эта погрешность не превышает

$0,0001 \text{ \AA}$ для всех изотопов. Следует подчеркнуть, что такая высокая воспроизводимость получена при сравнительно небольшом числе наблюдений.

На графике (рис. 6) точки для каждой разности хода фактически представляют результат обработки одной интерференционной спектрограммы. Среднее взвешенное значение длины волны красной линии для Cd^{112} и для

Таблица 3

Разность хода $2d$	λ (Å)	$\sigma \cdot 10^4$	$(\sigma) \cdot 10^4$
$\lambda_{\text{exp}} \text{Cd}^{112}$			
32,958	6438,4695	5	25
60,576	4693	3	9
93,880	4688	2	4
158,060	4692	2	4
200,000	4689	1	1
Среднее взвешенное	$6438,4690 \text{ \AA}$		43
$\sigma = \pm \sqrt{\frac{43}{4}} = \pm 0,0003 \text{ \AA} \quad S = \pm 0,00015 \text{ \AA}$			
$\lambda_{\text{exp}} \text{Cd}^{114}$			
32,958	6438,4666	11	121
32,958	4671	6	36
32,958	4675	2	4
60,576	4680	3	9
60,576	4677	0	0
60,576	4671	6	36
93,880	4675	2	4
93,880	4674	3	9
93,880	4677	0	0
158,060	4678	1	1
158,060	4674	3	9
158,060	4683	6	36
200,000	4674	3	9
200,000	4677	0	0
200,000	4680	3	9
Среднее взвешенное	$6438,4677 \text{ \AA}$		283
$\sigma = \pm \frac{283}{14} = \pm 0,0004 \text{ \AA} \quad S = \pm 0,0001 \text{ \AA}$			
$\lambda_{\text{exp}} \text{Cd}^{116}$			
32,958	6438,4662	2	4
60,576	4669	5	25
93,880	4662	2	4
158,060	4664	0	0
Среднее взвешенное	$6438,4664 \text{ \AA}$		33
$\sigma = \pm \sqrt{\frac{33}{3}} = \pm 0,0003 \text{ \AA} \quad S = \pm 0,0001 \text{ \AA}$			

Cd^{116} вычислено всего лишь по пяти измерениям и только для Cd^{114} число измерений (благодаря большому числу ламп) оказалось равным 15.

Для подтверждения повторяемости спектрограммы для лампы 1, при одной и той же разности хода в интерферометре, было обработано три спектрограммы и все три точки нанесены на график. В пределах погрешности метода все три точки хорошо согласуются друг с другом. Увеличением числа измерений, т. е. увеличением числа обработанных спектрограмм, можно было бы еще уменьшить среднюю квадратичную погрешность результата, но едва ли это имеет смысл для принципиальной оценки воспроизводимости линии, так как по всем имеющимся в литературе данным и нашим наблюдениям воспроизводимость длины волны самой красной линии естественного кадмия составляет величину $0,0001-0,0002\text{Å}$.

Для двух изотопов было изготовлено несколько ламп с различными давлениями постороннего газа. Определить точное значение величины смещения максимума линии при изменении давления не представлялось возможным, так как значение давления постороннего газа в лампах свыше 1 мм было известно лишь приближенно.

Чтобы установить точную зависимость смещения максимума линии от давления постороннего газа, необходимо иметь большое количество ламп с различными давлениями (по крайней мере от 1 до 10 мм рт. ст.). Однако имеющийся уже материал позволяет судить о характере, направлении и приближенной величине этого смещения. Для изотопа Cd^{114} величина этого смещения составляет всего лишь $0,0001\text{Å}$ на 1 мм рт. ст. Несколько большая величина этого смещения для изотопа Cd^{116} может быть объяснена недостаточно точно установленным значением давления в лампе 8 (3 мм рт. ст.) и более слабым свечением в ней линий кадмия, что привело к большим экспозициям и меньшим точностям при измерении диаметров колец. С увеличением давления максимум линии в обоих случаях смещался в сторону больших длин волн.

На основании изложенного можно сказать, что расширение красной линии, вследствие присутствия в лампе постороннего газа, несомненно имеет место, но оно мало и лежит за пределами точности наших измерений для ламп с давлением постороннего газа $0,3\text{ мм}$ рт. ст. и ниже.

Обнаруженное смещение максимума красной линии изотопического кадмия с изменением давления в лампе имеет приблизительно тот же порядок величины, как и для линий ртути Hg^{198} [4] и меньший, чем для линий криптона Kr^{84} и Kr^{86} [5]. Строгий контроль за температурой в печи позволял избегать самообращения в линии, наступавшего всякий раз, когда температура в печи поднималась выше 320°C , особенно в тех лампах, где было заключено большое количество кадмия (лампы 2 и 5).

4. Анализ точности сравнения длин волн спектральных линий

При интерференционных измерениях длин волн спектральных линий необходимо, прежде всего, с возможно большей точностью измерить дробную часть порядка интерференции.

Наиболее распространенным в спектроскопии и метрологии методом сравнения длин волн спектральных линий является метод наблюдения интерференционных полос равного наклона. Этот метод использован и в настоящей работе при фотографической регистрации колец равного наклона, полученных интерференционным эталоном Фабри и Перо. Точность наведения на интерференционный максимум при измерении диаметров колец равного наклона определяет точность вычисления дробной части порядка интерференции, а следовательно, и точность определения значений длин волн.

Дробная часть ϵ определяется по формуле:

$$\epsilon = \frac{2d}{\lambda f^2} R_p^2 - (p - 1), \quad (1)$$

где d — расстояние между зеркалами эталона Фабри и Перо;
 λ — длина волны;
 f — фокусное расстояние проектирующего интерференционную картину объектива;
 p — номер кольца, считая от центра;
 R — радиус интерференционного кольца.

Из ф-лы (1) следует, что разность квадратов диаметров двух смежных колец является постоянной величиной:

$$R_p^2 - R_{p-1}^2 = \text{const.} \quad (2)$$

Если кольца располагаются в изображении интерференционной картины так, что ф-ла (2) справедлива, то, измеряя диаметры все большего числа

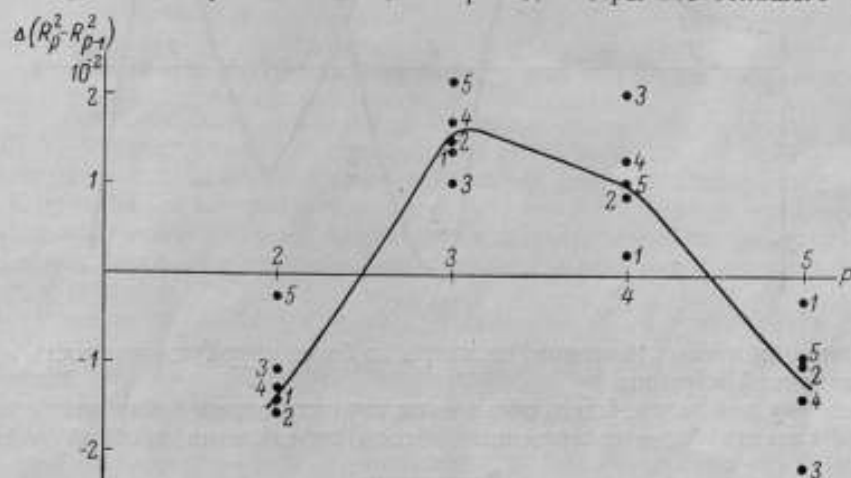


Рис. 8.

колец и обрабатывая эти совокупные измерения по методу наименьших квадратов, можно было бы уточнить значение дробной части ϵ .

Многочисленные измерения дробной части порядка интерференции для различных спектральных линий показывают, что отклонения от ф-лы (2) обычно превышают погрешности недостаточно точного измерения диаметров колец.

На рис. 8 приведен результат измерений для красной линии естественного кадмия в лампе с накаливаемыми электродами при разности хода $2d = 98$ мм. По горизонтальной оси отложены номера интерференционных колец, считая от центра картины, а по вертикальной — отклонения разностей квадратов $\Delta(R_p^2 - R_{p-1}^2)$ от постоянной, равной среднему значению. Измерение каждого диаметра выполнено пятью наблюдателями. На рис. 8 можно видеть, что расхождение между данными отдельных наблюдателей меньше, чем периодические отклонения от среднего значения разностей квадратов для различных колец. Это указывает на наличие некоторого систематического отклонения от закона распределения максимумов в изображении на фотопластинке интерференционной картины колец равного наклона. Измерения диаметров колец, соответствующих излучению отдельных изотопов, не давали в этом отношении больших преимуществ.

На рис. 9 приведены результаты измерения, соответствующие красной линии изотопического Cd^{116} (лампа 9) при разности хода 60 мм. Здесь мы видим значительные отклонения от закона квадратов для 10 наблюдаемых колец. Чтобы судить о точности наведения на центр интерференционного кольца, приведены данные второго наблюдателя для колец 4, 5, 6 и 7. Как видно, и в этом случае отклонения от правила квадратов не могут быть

объяснены различием в наведении на интерференционный максимум при повторных измерениях.

Какова бы ни была причина, вызывающая отклонение измеренных нами диаметров колец от правила квадратов, она не дает возможности дальнейшего увеличения точности определения дробной части ε при переходе к про-

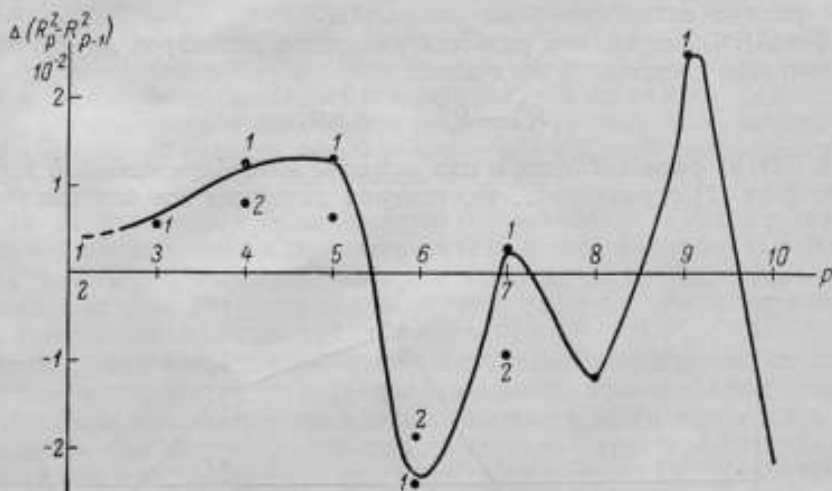


Рис. 9.

стым линиям четных изотопов, несмотря на более высокую видимость интерференционной картины.

Поэтому для дальнейшего повышения точности определения длины волны следует искать более совершенные методы определения дробной части ε .

Заключение

На основании проделанной работы мы можем предложить красную линию кадмия, излучаемую любым из трех изотопов Cd^{112} , Cd^{114} и Cd^{116} , в качестве основной спектральной линии. Однако нам кажется, что наиболее целесообразно выбрать красную линию, излучаемую изотопом Cd^{114} , так как процентное содержание его в общей смеси естественного кадмия самое большое.

Несмотря на то, что воспроизводимость длины волны красной линии естественного кадмия и ее ширина в имеющихся источниках света удовлетворяют технику современных измерений длины, красная линия изотопического кадмия благодаря своей простоте имеет ряд преимуществ. Уменьшение теплового расширения красной линии естественного кадмия путем применения специальных источников света не привело к существенному увеличению предела когерентности [3], а лишь дало возможность разрешить ее сверхтонкую структуру. Простота красной линии изотопического кадмия открывает возможности для отыскания новых источников, имеющих суженные спектральные линии.

Преимущество простой линии изотопического кадмия заключается еще и в том, что воспроизводимость ее длины волны не зависит от месторождения вещества, заполняющего источник света. У естественного кадмия в зависимости от его месторождения могут быть некоторые отклонения в процентном содержании изотопов и связанное с этим смещение центра тяжести сложной линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pérard, Rev. d'Opt. 7,1,1 (1928).
2. Романова М. и Ферхман А., ДАН СССР, 2, 1933.
3. Minkowski R. und Bruck H. Z. f. Ph. 95, 5, 284 (1935).
4. Barrell, Proc. of the R. S. Ser. A, 209, 1096, 132 (1951).
5. Kosters W. und Engelhard E., Proc. Verb. Com. In. Pds. Mrs 2, 22, 137, (1950).

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА

С тех пор, как была доказана конечность значения скорости света (в 1675 г.) интерес ученых к определению этого значения не ослабевал, и особенно возрос с момента открытия единства света и электромагнитных волн. С признанием электромагнитной теории света стало ясно, что скорость его распространения является одной из важнейших универсальных постоянных. Точное знание ее значения совершенно необходимо для многих отраслей физики и техники.

За точное значение скорости распространения света в вакууме в сборниках физических констант было принято число $C = 299\,776 \pm 4$ км/сек, полученное Берджем [1] в результате анализа всех измерений, произведенных до 1941 г.

Однако новые работы по измерению как скорости распространения света, так и сантиметровых радиоволн указывают на несоответствие этого значения действительности. Последние данные согласуются более с результатом, полученным Майкельсоном в 1926 г. [2], и значительно расходятся с табличным числом. На основании работ последних лет [3] склоняются принять за более достоверное значение C число 299 790 км/сек.

Таким образом, несмотря на очень большое количество проведенных экспериментальных работ по определению скорости распространения света и коротких радиоволн самыми разнообразными методами, задача установления достоверного значения скорости света как физической константы остается весьма актуальной.

Целью настоящей работы явилась разработка метода, отличного от всех ранее опубликованных, и проведение в СССР измерения скорости распространения света с достаточно высокой степенью точности.

Хорошо известно, что скорость распространения света может быть определена из следующего соотношения:

$$C = \lambda \nu \quad (1)$$

где λ — длина световой волны;
 ν — частота световых колебаний.

Длина световых волн для большинства спектральных линий определена с большой точностью интерференционными методами. Что же касается частоты световых колебаний, то она не может быть измерена абсолютно. Поэтому для определения скорости распространения света пользуются специальным методом.

Обычно создают ряд кратковременных световых импульсов, чередующихся через равные промежутки времени, и определяют время, за которое световой импульс, проходит известное расстояние. Тогда

$$C = \frac{2L}{\tau}, \quad (2)$$

где τ — тот промежуток времени, за который свет проходит известное расстояние $2L$.

Практически удобнее определять не малую величину промежутка времени τ , а, пользуясь периодическим характером возбуждения импульсов, измерять частоту возникновения импульсов ν_m и число периодов P за промежуток времени τ , так что:

$$C = \frac{2L\nu_m}{P}, \quad (3)$$

где L — база;

ν_m — частота модуляции;

P — число периодов.

В соответствии с ф-лой (3) задачу по определению скорости света лабораторными методами следует разделить на три: а) измерение длины базы; б) измерение частоты модуляции; в) определение числа периодов модулированных колебаний.

Методы измерения скорости распространения электромагнитных волн можно условно разделить либо по способу модуляции, либо по длине волны на: оптико-механические, электро-оптические, электрические, радиотехнические.

1. Принцип действия интерференционного модулятора

Предложенный в работе модулятор можно отнести к типу оптико-механических, так как его действие основано на непрерывном периодическом изменении разности хода интерферирующих пучков при быстром вращении стеклянной плоскопараллельной пластинки в пространстве

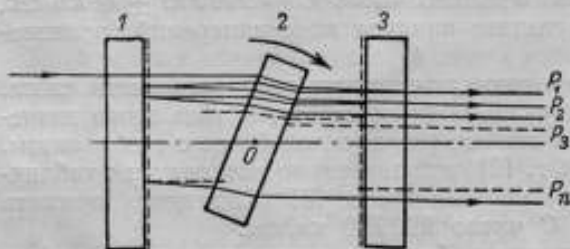


Рис. 1.

плоскопараллельной пластинки в пространстве между двумя полусеребрянными зеркалами (рис. 1). На плоскости зеркал 1 и 3, обращенных друг к другу, нанесены светоделительные слои серебра или алюминия, имеющие коэффициент отражения $R = 0,80-0,90$. Плоскости зеркал установлены

параллельно друг другу так, что при освещении их пучком монохроматического света можно наблюдать известное явление интерференции равного наклона. После многократных отражений от плоскости зеркал 1 и 3 из модулятора выходит множество параллельных пучков $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$, интерферирующих между собой. В результате переналожения этих пучков можно наблюдать узкие интерференционные максимумы, разделенные широкими минимумами. Если плоскопараллельную стеклянную пластинку 2, введенную в пространство между зеркалами 1 и 3, вращать с большой скоростью, то, очевидно, порядок интерференции будет быстро и периодически меняться. Под порядком интерференции здесь надо понимать число длин полуволн монохроматического излучения, которое укладывается в длину, определяемой выражением:

$$d = d_1 + F(d_2, n, i \dots), \quad (4)$$

где d_1 — расстояние между зеркалами;

d_2 — толщина плоскопараллельной пластинки;

n — показатель преломления той же пластинки;

i — угол падения лучей на пластинку.

Это изменение порядка интерференции, связанное с зависимостью разности хода интерферирующих пучков от угла поворота пластинки, приведет к периодическому появлению максимумов и минимумов интерференции в нормальном к плоскостям зеркал направлении. Иными словами, на несущую

частоту ν_1 монохроматического излучения будет накладываться частота ν_2 , определяемая быстротой смены максимумов и минимумов в зависимости от скорости вращения и оптической толщины пластинки 2.

Быстрое прохождение узкого интерференционного максимума дает возможность получать весьма кратковременные световые импульсы. Полупродолжительность этих импульсов зависит от формы интерференционных максимумов, которые в свою очередь зависят от коэффициента отражения светоделительных слоев зеркал и поглощения во вращающейся пластинке. Чем выше коэффициент отражения слоев зеркал и меньше поглощение в пластинке, тем интерференционные максимумы становятся более узкими, а следовательно

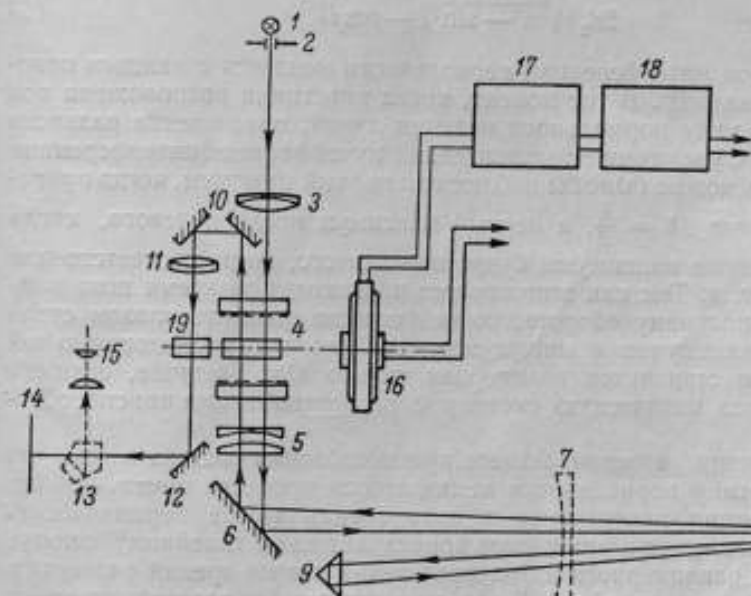


Рис. 2.

тельно, импульсы — более короткими. При значениях коэффициента $R = 0,85 - 0,90$ и просветленных поверхностях вращающейся пластинки можно считать, что ширина интерференционных максимумов приблизительно в десять раз меньше расстояния между ними.

Для пояснения действия модулятора обратимся к рис. 2. Свет от источника 1 параллельным пучком лучей падает на интерференционный модулятор, который состоит из двух плоских зеркал 4 со светоделительными слоями серебра, и плоскопараллельной пластинки, вращаемой с постоянной скоростью синхронным мотором 16. После многократных отражений пучка лучей от светоделительных слоев зеркал модулятора из него выходит множество пучков (обладающих некоторой разностью хода), которые падают на удаленные зеркала 7 и 8 и возвращаются после отражения от них в модулятор. При вторичном прохождении пучка лучей через модулятор вновь происходят многократные отражения от его зеркал. При неподвижном положении пластинки разность хода, приобретаемая пучками при их возвращении в модулятор, равна той разности, которую они имели при прямом ходе, что позволяет наблюдать интерференционные полосы переналожения. Эти полосы имеют то же происхождение, что и полосы, наблюдаемые в зрительную трубу, фокусированную на бесконечность, перед которой установлены под небольшим углом друг за другом два эталона типа Фабри и Перо одинаковой толщины. Наличие плоскопараллельной пластинки (в неподвижном состоянии) не меняет вида интерференционных полос, но лишь вносит некоторую дополнительную разность хода, одинаковую для всех пучков.

Совершенно изменится характер наблюдаемой картины, если плоскопараллельную пластинку модулятора привести в быстрое вращение. За то время, пока пучок света проходит до удаленного зеркала и обратно, пластинка успеет повернуться на некоторый небольшой угол. Такой поворот пластинки вносит дополнительную разность хода в пучок, вернувшийся в модулятор. Это явление вызывает изменение порядка интерференции и должно было бы привести к смещению интерференционных полос. Однако в действительности приращение разности хода с изменением угла поворота пластинки происходит не по линейному закону. Закон изменения разности хода выражается довольно сложной зависимостью и может быть представлен формулой:

$$\delta = 2d_2 (\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i) \quad (5)$$

Поэтому порядок интерференции периодически меняется с каждым поворотом пластинки на 180° . В тот момент, когда пластинка расположена под углом, близким к углу нормального падения лучей, приращение разности хода равно нулю. С увеличением угла падения лучей порядок интерференции возрастает, и тогда можно было бы наблюдать: первый минимум, когда приращение разности хода $\Delta\delta = \frac{\lambda}{2}$, а первый максимум после нулевого, когда $\Delta\delta = \lambda$. Последующие максимумы будут иметь место, когда соответственно $\Delta\delta = 2\lambda, 3\lambda \dots$ и т. д. Так как этот процесс происходит за время пока пластинка совершит половину оборота, то невозможно заметить глазом столь быструю смену максимумов и минимумов. Наблюдение последовательной смены максимумов становится возможным только в том случае, если его осуществляют через оптическую систему с развертывающим приспособлением.

Сущность действия развертывающего приспособления состоит в том, что наблюдаемую картину периодически меняющегося процесса изменения порядка интерференции перемещают в поле зрения также периодически. Так как смена максимумов и минимумов происходит не по линейному закону, то для получения равномерного их распределения в поле зрения развертку следует сделать также нелинейной. В качестве оптического развертывающего приспособления удобно использовать плоскопараллельную стеклянную пластинку, равную основной по толщине и показателю преломления и укрепленную на той же оси вращения. Для этой цели пучок лучей направляется двойным зеркалом 10 в объектив 11, который проектирует изображение щели 2 в плоскости фотографической пластинки 14. На пути хода лучей расположена пластинка 19, играющая роль развертывающей быстро меняющегося периодического процесса изменения разности хода при вращении пластинки модулятора. Поворачиваясь, пластинка 19 смещает световой луч так, что изображение щели на фотопластинке перемещается на некотором линейном участке. Когда приращение разности хода равно целому числу длин световых волн, изображение щели освещено наиболее ярко, так как имеет место максимум интерференции. Эти максимумы фиксируются на фотопластинке так, что в результате получается последовательное чередование равноотстоящих светлых и темных полос. Для пояснения принципа измерения скорости распространения света с помощью вышеупомянутой оптической схемы приведем следующие рассуждения.

Пусть за тот малый промежуток времени τ , когда луч света проходит известное расстояние $2L$, плоскопараллельная стеклянная пластинка модулятора повернется на угол Δi . Постараемся отыскать такое значение угла i , при котором приращение разности хода составит величину λ , т. е. произойдет изменение порядка интерференции на единицу. Считая величины $\Delta\delta$ и Δi малыми и исходя из ф-лы (5), можно написать

$$\Delta\delta = \frac{2d_2 \sin i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} (\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i) \Delta i \quad (6)$$

Таким образом, первый максимум можно будет наблюдать, когда

$$\lambda = \frac{2d_2 \sin i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} (\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i) \Delta i,$$

При равномерном вращении пластинки величина Δi определяется выражением

$$\Delta i = 2\pi N \tau,$$

где N — число оборотов пластинки в секунду.

Так как из ф-лы (2)

$$\tau = \frac{2L}{C},$$

то

$$\Delta i = \frac{4\pi N L}{C},$$

и тогда первый максимум будет виден, если:

$$\lambda = \frac{2d_2 \sin i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} (\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i) \frac{4\pi N L}{C}. \quad (7)$$

Чтобы решить, насколько развертывающее приспособление сместит изображение первого максимума по отношению к нулевому, обратимся к рис. 3.

Смещение изображения выразится отрезком

$$a = OO' \sin(i - r),$$

где

$$OO' = \frac{d_2}{\cos r}.$$

Так как

$$n = \frac{\sin i}{\sin r},$$

то

$$a = \frac{d_2 \sin i (\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}.$$

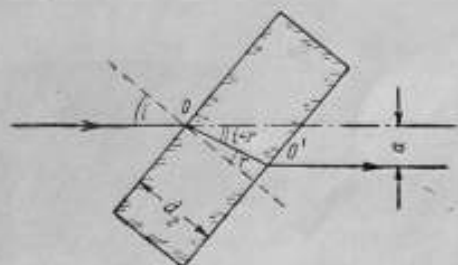


Рис. 3.

Таким образом, подставляя полученное выражение в ур-ние (7), находим:

$$\lambda = 2a \frac{4\pi N L}{C},$$

и окончательно

$$C = \frac{8\pi N a L}{\lambda}. \quad (8)$$

Согласно этой формуле, измерение скорости распространения света сводится к измерению: числа оборотов пластинки модулятора, длины базы и величины a — расстояния между интерференционными полосами при известном значении длины волны λ примененного монохроматического света.

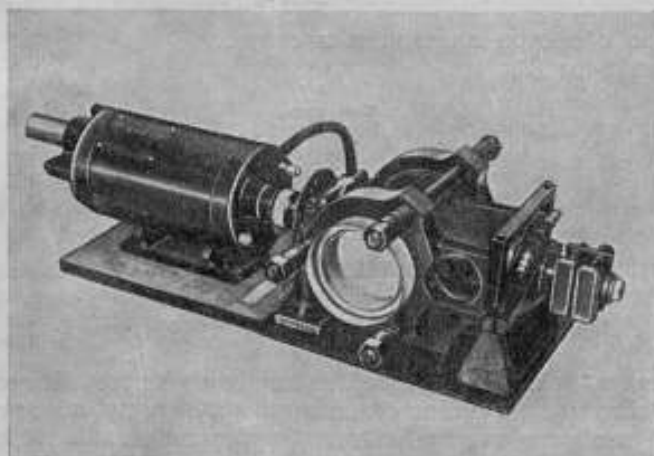
Общий вид модулятора и отдельные его части представлены на рис. 4, а и 4, б.

Корпус модулятора 1 (рис. 4, б), изготовленный из стали, представляет собой полый цилиндр с двумя ватрубками. Торцевые поверхности этого цилиндра доведены до высокой степени плоскостности и параллельности, так что к ним можно притереть на оптический контакт зеркала 2 и 3, каждое из которых представляет блок, состоящий из двух плоских стеклянных пластин разного диаметра, соединенных друг с другом также оптическим контактом. Рабочими являются пластины меньшего диаметра, входящие в полость корпуса. На поверхности пластин нанесены отражающие светоделительные слои серебра. Собранный система представляет собой не что иное, как интер-

ференционный эталон типа Фабри и Перо. Способ крепления зеркал на оптическом контакте обеспечивает постоянство длины и плоскопараллельности эталона.

Через боковое отверстие патрубка корпуса 1 вставляется рамка 6 с плоскопараллельными стеклянными пластинками 4 и 5, которая вращается на шарикоподшипниках вокруг горизонтальной оси. Выверка параллельности

a)



b)



Рис. 4.

оси вращения рамки плоскостям зеркал 2 и 3 осуществлялась вращением эксцентричной втулки подшипника в крышке 9 и контролировалась автоколлимационным методом. При помощи фланцев 7 и тяг 8 корпус модулятора можно незначительно деформировать с целью исключения остаточной непараллельности зеркал. Такая подгонка контролировалась наблюдением интерференционных колец равного наклона при освещении зеркал модулятора параллельным пучком монохроматического света.

Модулятор в собранном виде располагается на подставках 12. Для прохождения светового пучка через разворачивающую пластинку 5 в патрубке предусмотрены два отверстия с защитными стеклами 13. Приспособление 14 с маленькими зеркалами, расположенное на оси крышки 9, служит для контроля положения всего модулятора на установке. На выступающей части оси рамки прикреплены предохранительные шайбы 11 и муфта 10 для соединения его с приводом.

Точность определения скорости распространения света во многом зависит от способа и частоты модуляции светового потока, идущего от источника. Под световой модуляцией в широком смысле слова следует понимать воздействие на световой поток какого-либо физического явления, вызывающего периодические изменения направления, величины или структуры этого потока.

Мы не считаем необходимым останавливаться подробно на описании различных типов модуляторов, а укажем на характерные особенности тех, которые применялись в работах по определению скорости распространения света.

Основными характерными параметрами всякого модулятора является максимальная частота модуляции и форма импульсов, определяющая их полупродолжительность. Чем выше частота модуляции и чем меньше полупродолжительность импульсов, тем меньше погрешность в определении значения скорости распространения света при измерениях на коротких базах.

В табл. 1 представлены типы модулирующих устройств и их сравнительные данные.

Таблица 1

Типы модуляторов	Форма импульсов	Частота модулятора ν в МГц	Длина базы L в м	Число наблюдений n	Полупродолжительность импульса Δt в сек.	Продолжительность одного периода t в сек.
Зубчатое колесо [3]	Прямоугольная (синусоидальная)	0,1	46 000	32	$2500 \cdot 10^{-9}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Вращающееся зеркало [2]	Пикообразная	0,008	35 000	2	$600 \cdot 10^{-9}$	$125 \cdot 10^{-6}$
Элемент Керра [4]	Синусоидальная	7,2	170	8	$34 \cdot 10^{-9}$	$0,14 \cdot 10^{-6}$
Элемент Керра [5]	"	12,6	40	3	$20 \cdot 10^{-9}$	$0,08 \cdot 10^{-6}$
Элемент Керра [6]	"	19,2	40	4	$13 \cdot 10^{-9}$	$0,05 \cdot 10^{-6}$
Элемент Керра [7]	"	8,6	9 000	100	$29 \cdot 10^{-9}$	$0,12 \cdot 10^{-6}$
Дифракционная решетка в пьезокварце [8]	"	115	38	29	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$0,009 \cdot 10^{-6}$
Интерференционный модулятор	Пикообразная	47	48	15	$1 \cdot 10^{-9}$	$0,021 \cdot 10^{-6}$

Из таблицы видно, что наименьшая полупродолжительность импульсов соответствует интерференционному модулятору.

2. Описание стационарной установки

Специфический характер предложенного способа модуляции потребовал применения оптической схемы, отличной от существующих. Была разработана и осуществлена специальная оптическая схема (рис. 2), позволившая наблюдать и регистрировать интерференционные максимумы, число которых в поле зрения прибора пропорционально величине запаздывания светового пучка при прохождении им некоторого известного расстояния.

Свет от источника 1 (ртутная лампа сверхвысокого давления), пройдя щель 2, падал на объектив 3. Щель находилась в главном фокусе объектива,

так что из него выходил параллельный пучок лучей. Зеленая линия спектра ртути выделялась фильтром, не показанным на рисунке. Далее, световой пучок попадал в интерференционный модулятор 4, по выходе из которого, отразившись от плоского зеркала 6, падал на систему концевых отражателей 7 и 8, представляющих собой два сферических зеркала. При помощи линзы 5 (с фокусным расстоянием 5 м) изображение источника света проектировалось в центр кривизны обоих зеркал-отражателей. Так как вогнутое зеркало дальнего отражателя имело радиус кривизны 35 м, а ближнего — 11 м, то при установке на расстоянии 24 м друг от друга, зеркала имели общий центр кривизны, расположенный в точке, удаленной от проектирующей линзы на 5 м.

Такая система позволяла очень точно проверить ход лучей автоколлимационным методом и получить отражения от дальнего и ближнего зеркал-отражателей без нарушения автоколлимации и фокусировки резкого изображения щели на фотопластинке камеры 14. Ближнее зеркало-отражатель 7 могло быть включено в световой пучок или выключено из него путем перемещения в боковом направлении. В том случае, когда зеркало 7 выключалось, пучок лучей проходил к дальнему зеркалу 8 и, после отражения от него, попадал на прямоугольную призму 9. Отразившись от граней призмы, световой пучок снова возвращался к концевым отражателям. Введение дополнительной призмы 9 позволило увеличить длину хода светового пучка в два раза, так что при расстоянии между зеркалами 7 и 8, равном 24 м, база была равна 48 м.

После вторичного отражения от концевых отражателей световой пучок возвращался в модулятор и при помощи двойного зеркала 10 направлялся в объектив 11. Перед призмой 9 была установлена диафрагма в виде узкой щели, и объектив 11 проектировал изображение этой щели в уменьшенном масштабе на плоскость фотографической пластинки 14. Для визуального наблюдения можно было вводить в световой пучок призму 13, посредством которой картина интерференционных полос попадала в окуляр 15.

На основании этой оптической схемы была создана стационарная установка для измерения скорости распространения света (рис. 5). На массивном столе смонтированы основные узлы установки: интерференционный модулятор в кожухе 1, синхронный мотор 2, пусковой мотор (под крышкой стола) 3, коллиматор с источником света 4, проектирующая оптическая система 5, устройство для наблюдения и фотографирования 6 и пульт управления 7 синхронным мотором 2. Внизу расположены блок усилителей типа У-50 и У-300 и выпрямитель УМ-1500 для питания синхронного мотора частоты эталонного генератора ВНИИМ.

Концевые отражатели были установлены на расстоянии 24 м друг от друга, так что расстояние между отражающими поверхностями зеркал могло быть определено с достаточной точностью посредством геодезических инварных проволок. Благодаря введению системы концевых отражателей измерение базы сводилось к измерению расстояния между ними.

Чтобы перейти от исходного расстояния между штрихами инварной проволоки к расстоянию между концевыми отражателями, инварную проволоку с отсчетными шкалами располагали над зеркалами концевых отражателей в непосредственной близости от их верхних краев. В верхней части зеркала были установлены на оптическом контакте два боковичка в виде стеклянных брусков с металлизированными верхними поверхностями, на которых были нанесены по три поперечных и одному продольному штриху. Отсчеты по штрихам боковичков и одновременно по делениям шкал проволоки производились посредством микроскопов с окулярными микрометрами. Такая система сравнения позволила обеспечить измерение длины базы с точностью до $\pm 0,1$ мм.

Сферические концевые отражатели (рис. 6 и 7) представляют собой вогну-

тые зеркала (диаметр 248 мм, радиусы кривизны: ближнего отражателя — 11 м, дальнего — 35 м), установленные на массивных штативах. Конструкция зеркал допускает выверку их по азимуту и наклону, а также перемещение в продольном направлении.

На столе с массивным основанием 1 (рис. 6), установленном при помощи трех опорных винтов 2, расположены направляющие 3, по которым перемещается каретка 4, несущая вогнутое сферическое зеркало отражателя в оправе 5. Винты 6 и 7 допускают наклон и поворот оправы с зеркалом на небольшие углы в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

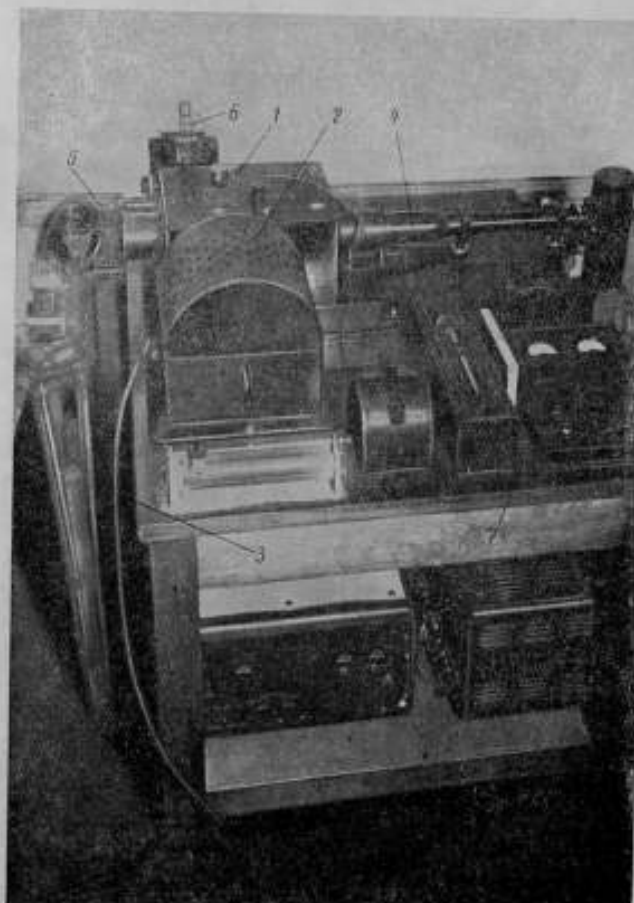


Рис. 5.

На рис. 7, изображен ближний концевой отражатель в положении, когда зеркало введено в пучок света; для выведения его из пучка каретку 4 перемещают по направляющим 3, и световой пучок проходит через отверстие в кронштейне 8 к дальнему зеркалу. Для отсчетов по шкале геодезической инварной проволоки 7 и штрихам боковичков служат микроскопы 10.

Регистрация интерференционных картин, получающихся при отражениях от дальнего и ближнего зеркал отражателей, осуществлялась фотографическим методом. На photographиях получалось изображение ряда равноотстоящих друг от друга интерференционных максимумов. Для определения величины a достаточно было бы измерить расстояние между крайними, еще заметными на пластинке максимумами и разделить его на число максимумов.

Это справедливо, если в качестве базы взят весь путь светового пучка при отражении от любого из отражателей.

Однако систематическая погрешность, связанная с определением всего хода светового пучка, исключается, если принять в качестве базы, как это и было сделано, расстояние L_0 между концевыми отражателями. Тогда определение величины a можно свести к измерениям некоторого фиксированного расстояния l_0 в фокальной плоскости объектива камеры и разности чисел $P_2 - P_1$ интерференционных максимумов, укладывающихся в этом расстоянии при отражениях от дальнего и ближнего отражателей.

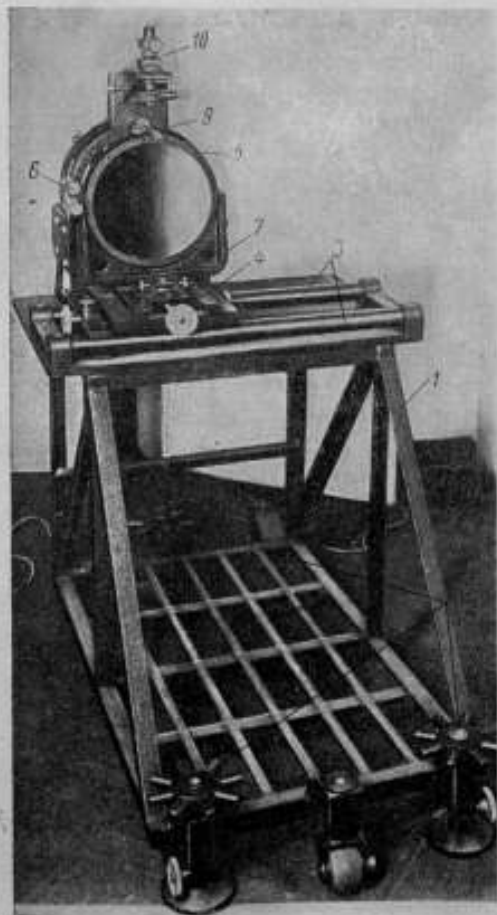


Рис. 6.

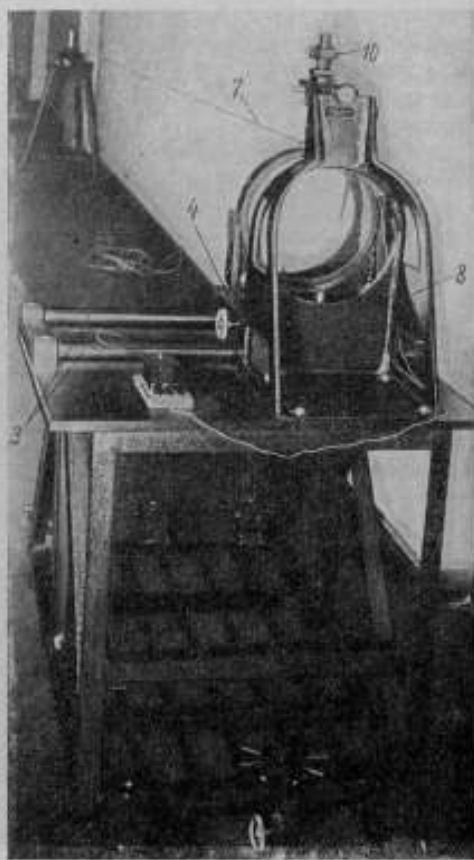


Рис. 7.

Действительно, из ф-лы (8) вытекает, что при постоянном значении N и λ произведение La тоже должно быть постоянным, т. е. $L_1 a_1 = L_2 a_2 = \dots = L_0 a_0$.

Если увеличить длину хода светового пучка L , то a должно соответственно уменьшиться и число полос, приходящихся на некоторый фиксированный участок поля зрения l_0 , увеличивается.

Таким образом, каждому расстоянию L_1, L_2, \dots, L_0 соответствует свое значение a_1, a_2, \dots, a_0 и свое число интерференционных полос P_1, P_2, \dots, P_0 , укладывающихся в фиксированном участке l_0 , причем

$$a = \frac{l_0}{P}, \quad a_1 = \frac{l_0}{P_1}, \quad a_2 = \frac{l_0}{P_2}.$$

Так как нам точно известно расстояние $L_2 - L_1 = L_0$, то необходимо вычислить расстояние между интерференционными полосами a , соответствующее длине L_0 . Имеем:

$$L_1 = \frac{L_0 a_2}{a_1}, \quad L_2 - \frac{L_0 a_2}{a_1} = L_0,$$

$$L_2 \left(1 - \frac{a_2}{a_1}\right) = L_0, \quad L_2 = \frac{L_0 a_1}{a_1 - a_2},$$

$$\frac{a_0}{a_2} \left(1 - \frac{a_2}{a_1}\right) = 1, \quad a_0 = \frac{a_1 \cdot a_2}{a_1 - a_2},$$

так как

$$a_1 = \frac{l_0}{P_1} \text{ и } a_2 = \frac{l_0}{P_2},$$

то

$$a_0 = \frac{l_0}{P_2 - P_1}$$

и тогда ф-ла (8) примет вид:

$$C = \frac{8\pi N L_0 l_0}{\lambda (P_2 - P_1)}.$$

По этой формуле и были произведены вычисления значения C .

Границы, в которых укладывается определенное число максимумов при отражениях как от дальнего, так и от ближнего отражателей, должны быть однозначно определены на каждой фотографии. Для этого на фотопластинку либо перед фотографированием, либо сейчас же после фотографирования интерференционных полос посредством контактной печати (с помощью специального трафарета) наносили систему из десяти пар штриховых марок. Трафарет представлял собой стеклянную пластинку, покрытую тонким слоем алюминия, на которую с помощью делительной машины острым резцом было нанесено десять пар равноотстоящих друг от друга прозрачных тонких штрихов-марок. Расстояние между штрихами на трафарете было измерено на универсальном микроскопе и оказалось равным $24,2300 \pm 0,0001$ мм. Это расстояние и было принято за l_0 .

На рис. 8 и 9 в качестве примера приведены фотографии интерференционных картин с впечатанными тонкими штрихами-марками.

Определив по интерферограммам значение a и l , можно найти P_1 . При таком определении величин P_1 и P_2 в вычисления войдет абсолютное значение расстояния между изображениями крайних максимумов на фотопластинке. Это расстояние вследствие сжатия или растяжения фотослоя в процессе проявления может не совпасть с действительным расстоянием между максимумами, что внесет некоторую систематическую погрешность в определение скорости распространения света. Для ее исключения в значение скорости света вводилась поправка на искажение фотослоя, которая определялась как разность между действительным значением расстояния между марками на трафарете и значением расстояния между изображениями тех же марок на фотопластинке.

Во избежание необходимости введения такой поправки при последних измерениях метод определения P был несколько изменен. Измерение значения P сводилось к определению отношения расстояний крайних полос до марки к расстоянию между полосами. Для этого был изменен метод фотографирования. Интерференционные картины от дальнего и ближнего отражателей последовательно фотографировали на одну пластинку, и между рядами полос впечатывали штрихи-марки (рис. 10).

На рис. 11 схематически изображено положение интерференционных полос на снимках.

На участок *A* производилось фотографирование интерференционных полос при отражении светового пучка от ближнего зеркала-отражателя, а на участок *B* — от дальнего. Перемещая кассету фотокамеры влево, удалось поместить на один фотоснимок десять таких изображений полос. Специальная рамка позволяла точно ориентировать шкалу с марками относительно положения полос на фотоснимке. На подвижной части кассеты имелась отметка, позволявшая фиксировать ее во время фотосъемки.

Если обратиться к схеме (рис. 11), то можно видеть что P_2 состоит из целого числа n_2 интервалов между полосами, укладываемых между штри-

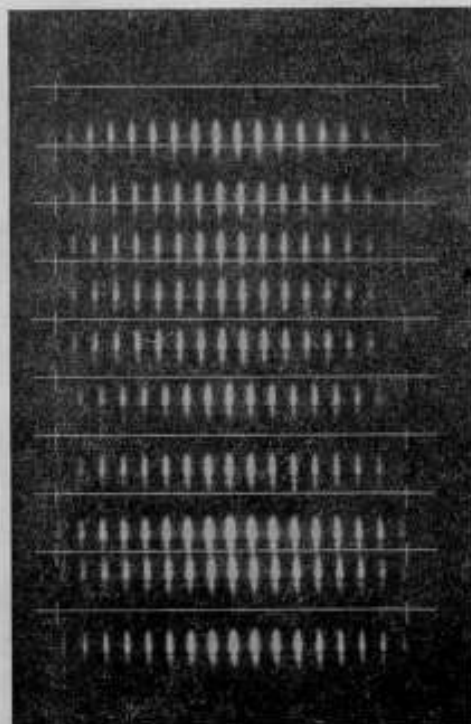


Рис. 8.

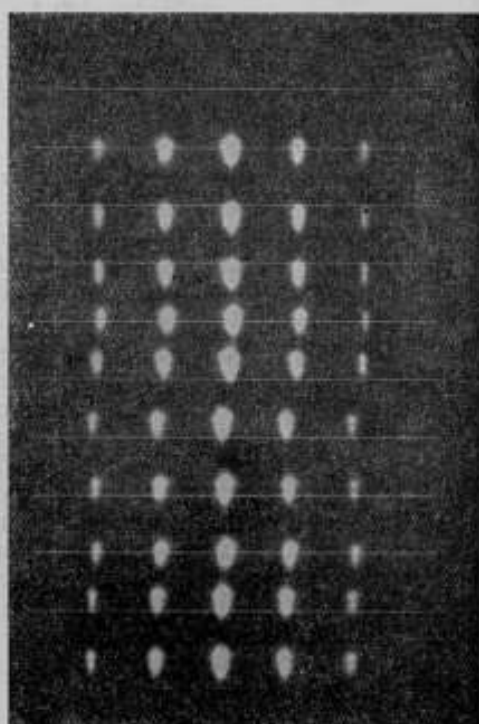


Рис. 9.

хами M_1 и M_2 , и дробной части $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + \varepsilon_2''$. В свою очередь P_1 состоит из целого числа n_1 и дробной части $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + \varepsilon_1''$.

Что касается целых чисел n_2 и n_1 , то их легко сосчитать, а величины ε_2 и ε_1 можно получить из измерений расстояний между крайней полосой и соответствующей ей ближней маркой на компараторе типа ИЗА-2.

Величину разности порядков можно сосчитать, исходя из следующего:

$$\begin{aligned} P_2 &= n_2 + \varepsilon_2' + \varepsilon_2'' \\ P_1 &= n_1 + \varepsilon_1' + \varepsilon_1'' \\ P_2 - P_1 &= n_2 - n_1 + \varepsilon_2' + \varepsilon_2'' - \varepsilon_1' - \varepsilon_1'' \end{aligned}$$

где все ε_i представляют собой дробные части порядка интерференции, т. е. смещение интерференционных максимумов от штриха-марки, выраженное в долях расстояния между полосами.

Так как в этом случае производилось определение лишь дробной части порядка, и величина расстояния между изображениями максимумов на пластинке исключалась, то вводить поправку на искажение фотослоя более не требовалось.

Точность измерения скорости распространения света предложенным методом, главным образом, зависит от точности определения значения разности $P_2 - P_1$, последняя же ограничивается точностью наведения нити биссектора измерительного компаратора на интерференционный максимум.

Для повышения точности наведения на максимум и на штрих, в работе предложен и применен при измерениях интерферограмм новый фотоэлектрический метод, позволивший в два раза повысить точность наведения на изображение интерференционного максимума.

На рис. 12 дана схема фотоэлектрического приспособления к компаратору для ливейных измерений типа ИЗА-2.

Свет от источника 1 направляется конденсатором 2 на узкую щель 3. Микрообъектив 4 проектирует изображение щели на плоскость объекта 5. На пути лучей, идущих в микрообъектив, находится вибратор 6, состоящий из электромагнитной системы и плоского зеркала, укрепленного на его оси. Схема вибратора представлена на рис. 13.

Ось 1 вибратора несет на себе якорь 2 и плоское зеркальце 3. Катушки 4 (вторая катушка на рисунке не видна) служат для приведения подвижной системы вибратора в колебательное движение. Под действием переменного тока, проходящего через обмотку катушек ви-

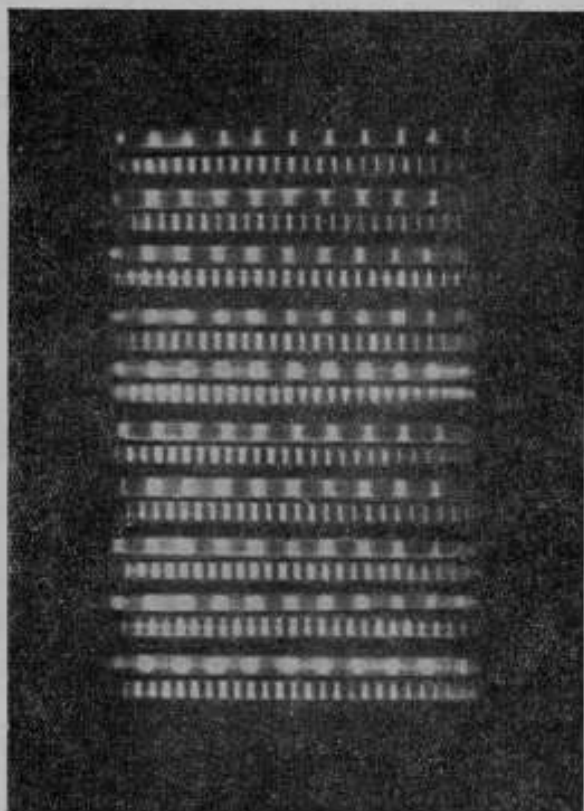


Рис. 10.

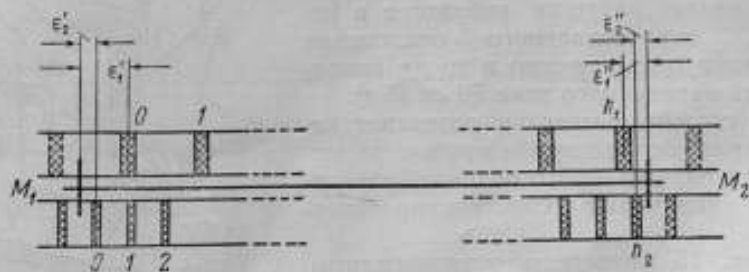


Рис. 11.

братора, якорь поворачивает подвижную систему на некоторый угол, а пружина 5 возвращает ее в исходное положение. Таким образом подвижная система приходит в колебательное движение с частотой переменного тока, подводимого к обмоткам катушек вибратора. Все детали вибратора крепятся в корпусе 6.

При повороте зеркальца вибратора на угол α луч света, идущий к микрообъективу, повернется на угол 2α , что вызовет перемещение изображения щели 3 (рис. 12) в плоскости объекта 5 на величину S . Это перемещение будет периодическим, так что изображение щели будет обегать некоторый участок объекта в направлении, перпендикулярном оси вращения подвижной системы вибратора. Прошедший через объект пучок лучей собирается вторым микрообъективом 7 и при помощи призмы 8 направляется на фотозлемент 9.

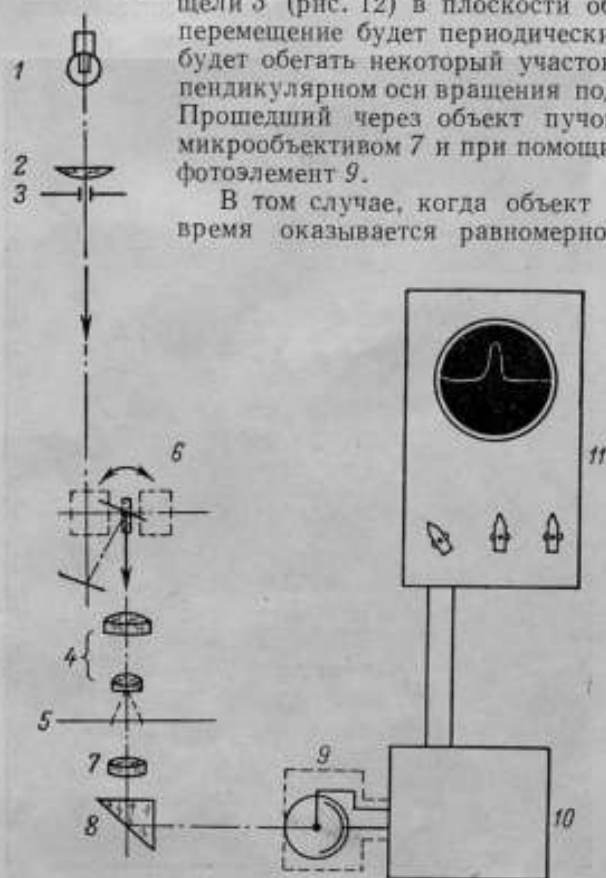


Рис. 12.

В том случае, когда объект отсутствует, фотозлемент все время оказывается равномерно освещенным. Если объект представляет собой чередование различных плотностей (например, штрихи на фотопластинке или изображение интерференционных максимумов), то фотозлемент будет освещен переменным световым потоком, а характер этих изменений будет соответствовать характеру самого объекта. Фотозлемент включен в схему усилителя переменного тока 10 (рис. 14). Выходное усиленное напряжение подается на катодный осциллограф 11 типа ЭО-5.

Таким образом, на пластины вертикального отклонения катодно-лучевой трубки подается переменное напряжение, соответствующее изменениям светового потока

и вызванное наличием того или иного объекта в фокальной плоскости микрообъектива. Горизонтальное отклонение электронного луча синхронизовано с движением оптического луча в вибраторе. Синхронизация достигается тем, что на отклоняющие катушки вибратора и на усилитель горизонтального отклонения осциллографа подается одно и то же напряжение сети переменного тока 50 гц (6 в).

Такая система развертки позволяет видеть на экране осциллографа кривые, характерные для определенного объекта, находящегося в фокальной плоскости микрообъектива.

На рис. 15 приведены осциллограммы, соответствующие:

- а) черному штриху на белом фоне;
- б) белому штриху на черном фоне;
- в) изображению интерференционных полос.

Фотоэлектрическое приспособление было смонтировано на компараторе для линейных измерений типа ИЗА-2 (рис. 16). В нижней части тубуса наблюдательного микроскопа вместо обычного микрообъектива расположена микро-

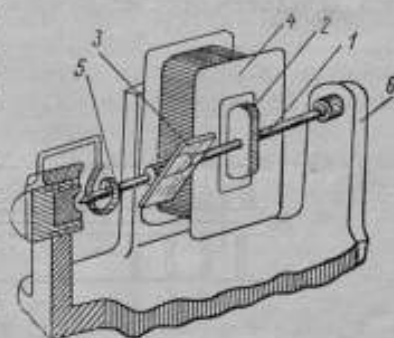


Рис. 13.

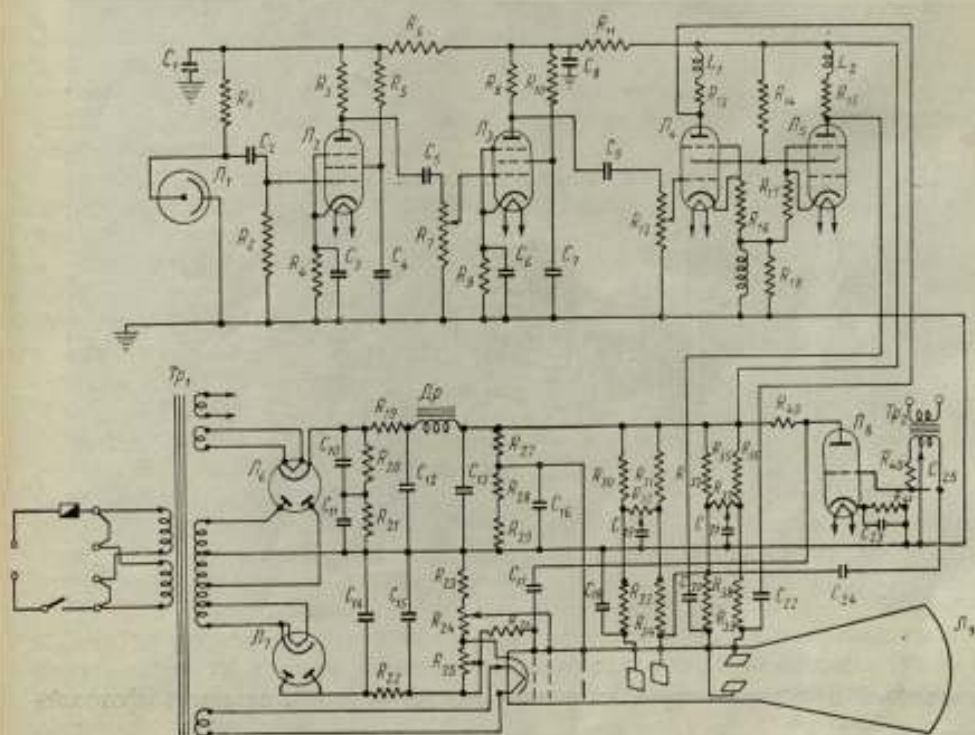


Рис. 14.

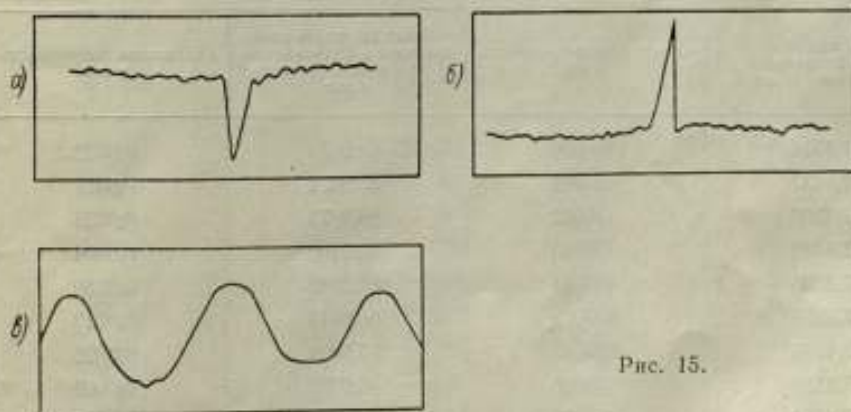


Рис. 15.

насадка с вибратором 1, а вместо окуляра — осветительная система 2. Пластина со штрихами или изображениями интерференционных полос 3 помещается на столике компаратора. Пучок света, проходящий через объектив, направляется при помощи призмы 4 на фотоэлемент типа СЦВ-3, смон-

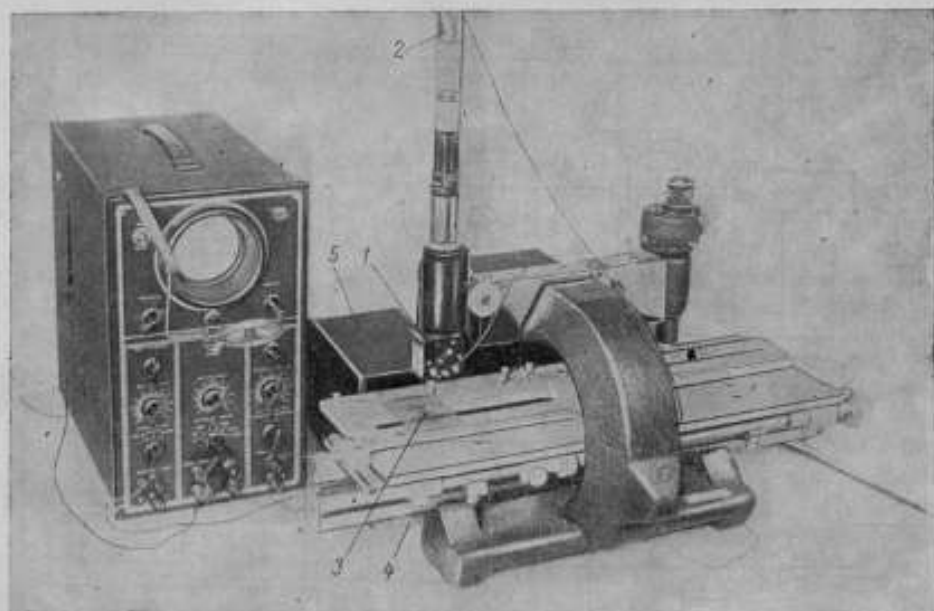


Рис. 16.

тированный в одном ящике с усилителем 5 (чувствительность фотоэлемента $100 \frac{\text{МКГ}}{\text{ДЮМ}}$).

При перемещении стола компаратора кривые, подобные изображенным на рис. 15, перемещаются по экрану осциллографа в горизонтальном направлении. Масштаб этого перемещения можно увеличивать и уменьшать изме-

Таблица 2

Отсчет по шкале компаратора. Визуальное наблюдение в мм	Отличная погрешность в мм	Отсчет по шкале компаратора с фотоэлектрическим приспособлением в мм	Остаточная погрешность в мм
77,4314	0,0030	86,9376	0,0022
77,4332	0,0048	86,9371	0,0027
77,4306	0,0022	86,9373	0,0025
77,4300	0,0016	86,9402	0,0004
77,4325	0,0041	86,9448	0,0050
77,4269	0,0015	86,9411	0,0013
77,4196	0,0088	86,9424	0,0026
77,4188	0,0096	86,9389	0,0009
77,4261	0,0023	86,9377	0,0021
77,4345	0,0061	86,9409	0,0012
Среднее 77,4284, $\sigma = \pm 0,0055$, среднее 86,9398, $\sigma = \pm 0,0026$			

нением горизонтального отклоняющего напряжения на выходе усилителя осциллографа (по оси X). В нашем случае можно было менять горизонтальный масштаб (т. е. линейное увеличение оптико-электронной системы) от $30\times$ до $140\times$. Изменения этого увеличения можно также достигнуть сменой проектирующего микрообъектива.

Чтобы охватить достаточное поле зрения, мы пользовались объективом $3,7 \times 0,12$. Разрешающая сила оптико-электронной системы целиком определялась апертурой микрообъектива и шириной проектируемой щели. При первых же экспериментах с фотоэлектрической системой были замечены значительное повышение чувствительности при наведении на штрих и полная объективность этого наведения.

В табл. 2 приведены примеры наведения на одну и ту же интерференционную полосу методом визуального наблюдения и с помощью фотоэлектрического приспособления.

Из таблицы видно, что точность наведения на изображение интерференционной полосы повышается почти в два раза при переходе на фотоэлектрическую регистрацию, осуществляемую указанным выше способом.

3. Результаты измерений

В 1951—1952 гг. на созданной стационарной установке были осуществлены измерения скорости распространения света. Измерения производились на базе приблизительно в 48 м при двух скоростях вращения пластинки модулятора 3750 и 5000 об/мин. с применением в качестве источника света ртутной лампы СВД, из излучения которой фильтром выделялась зеленая линия $\lambda = 0,5461 \text{ мк}$.

В табл. 3 даны значения скорости распространения света, приведенные к вакууму по обычным дисперсионным формулам с учетом поправки на групповую скорость, среднее значение скорости распространения света (из 10 серий измерений, произведенных в 1951 г.) и значение средней квадратичной погрешности результата.

В табл. 4, аналогичной табл. 3, приведены результаты 15 серий измерений, произведенных в 1952 г.

В 1952 г. измерения были произведены после некоторых усовершенствований стационарной установки и потому полученное число $C = 299788$ приводится в выводах как более точное.

Таблица 3

№ серий	C_1 в км/сек	ΔC_1 в км/сек
1	299788	-6
2	764	-30
3	787	-7
4	803	+9
5	792	-2
6	842	+48
7	782	-12
8	812	+18
9	782	-12
10	791	-3
Среднее $299794 \pm 6,5 \text{ км/сек}$ (с надежностью 0,7)		

Таблица 4

№ серии	C_0 в км/сек	δC_0 в км/сек
1	299782	-6
2	790	+2
3	825	+37
4	803	+15
5	825	+37
6	772	-16
7	782	-6
8	761	-27
9	777	-11
10	777	-11
11	755	-32
12	793	+5
13	778	-9
14	777	-11
15	813	+25

Среднее $299788 \pm 5,4$ км/сек (с надежностью 0,7)

Оба числа в пределах погрешностей измерений хорошо совпадают друг с другом и превышают ранее принятое табличное значение на 12—18 км/сек.

При измерениях систематические погрешности метода исключались путем введения ряда поправок, связанных с:

а) отклонениями частоты эталонного генератора ВНИИМ от номинального значения 1000 гц;

б) юстировкой модулятора и точностью изготовления его деталей;

в) возможным незначительным искажением изображения интерференционной картины на фотопластинке.

В 1951—1952 гг. измерения производились при различных значениях основных параметров установки (скорость вращения пластинки модулятора и длина хода светового пучка). Сходство полученных результатов в пределах случайных погрешностей до некоторой степени указывает на отсутствие систематических погрешностей.

Из основной ф-лы (9) следует, что относительная погрешность при измерении скорости распространения света выражается следующим образом:

$$\frac{\Delta C}{C} = \pm \sqrt{\left[\frac{\Delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1}\right]^2 + \left[\frac{\Delta N}{N}\right]^2 + \left[\frac{\Delta L_0}{L_0}\right]^2 + \left[\frac{\Delta l_0}{l_0}\right]^2 + \left[\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right]^2},$$

т. е. складывается из погрешности измерения разности порядков $P_2 - P_1$, погрешности измерения скорости вращения пластинок модулятора, погрешности измерения базы, погрешности измерения длины волны и погрешности измерения величины фиксированного расстояния. Решающее значение для величины $\frac{\Delta C}{C}$ имеет погрешность измерения разности порядков $\frac{\Delta P_2 - P_1}{P_2 - P_1}$.

Вычислим значение этой погрешности для одной серии наблюдений. При определении разности порядков $P_2 - P_1$ приходится измерять лишь дробные части этих порядков, измерение же последних сводится к наведению нити компаратора на четыре интерференционных максимума и на два штриха-марки.

В табл. 2 приведена погрешность однократного наведения на интерференционный максимум, выраженная в линейной мере и равная при применении фотоэлектрического способа $\pm 2,6$ мк. Так как расстояние между соседними максимумами было приблизительно равно 1 мм, то величина этой погрешности в относительной мере будет $\pm 2,10^{-3}$.

При измерениях снимков наведение на максимум производилось не менее пяти раз; погрешность результата пятикратного наведения при надежности равной 0,7 (средняя квадратичная), выразится как

$$\pm \frac{1,19 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{5}} = \pm 1,41 \cdot 10^{-3}.$$

Погрешность наведения на штрих можно принять равной $\pm 1 \cdot 10^{-4}$; тогда

$$\begin{aligned} \frac{\Delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1} &= \pm \frac{10^{-4} \sqrt{4 \cdot (14)^2 + 2 \cdot (11)^2}}{15} = \pm \frac{10^{-4} \sqrt{4 \cdot 196 + 2}}{15} = \\ &= \pm 10^{-4} \frac{\sqrt{786}}{15} = \pm \frac{10^{-4} \cdot 2,8}{15} = \pm 1,86 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Такая погрешность соответствует одному измерению скорости света на снимке, но так как каждый снимок соответствовал серии из 10 измерений, то погрешность результата одной серии будет

$$\frac{\Delta(P_2 - P_1)}{P_2 - P_1} = \pm \frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1}{\sqrt{10}} = \pm 0,64 \cdot 10^{-4}.$$

Если считать, что погрешность измерения базы $\frac{\Delta L_0}{L_0}$ равна $\pm 4 \cdot 10^{-6}$, погрешность измерения длины волны источника света $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \pm 2 \cdot 10^{-6}$, погрешность измерения скорости вращения пластинок модулятора $\frac{\Delta N}{N} = \pm 1 \cdot 10^{-7}$ и погрешность измерения фиксированного расстояния $\frac{\Delta l_0}{l_0} = \pm 4 \cdot 10^{-6}$, тогда

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &= \pm \sqrt{40,9 \cdot 10^{-10} + 16 \cdot 10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-14} + 16 \cdot 10^{-12}} = \\ &= \pm 10^{-5} \sqrt{40,9 + 0,16 + 0,04 + 0,0001 + 0,16} = \\ &= \pm 10^{-5} \sqrt{41,26} = \pm 6,4 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

откуда

$$\Delta C = \pm 6,4 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^8 = \pm 19,2 \text{ км/сек.}$$

Таким образом, вычисленная погрешность соответствует средней квадратичной погрешности ряда для рядов, приведенных в табл. 3 и 4.

Дальнейшее повышение точности предлагаемого метода возможно осуществить путем повышения скорости вращения пластинок модулятора, увеличения длины хода светового пучка (что повлечет за собой сужение интерференционных максимумов и увеличение их числа в данном фиксированном расстоянии), а также путем повышения точности наведения на интерференционный максимум при измерениях. Последнее возможно осуществить при применении непосредственной фотоэлектрической регистрации интерференционных полос без предварительного их фотографирования.

Выводы

1. Разработан новый метод измерения скорости распространения света с применением специального модулирующего устройства.
2. Создана стационарная установка для измерения скорости распространения света при сравнительно малых базисах, осуществляемых в лабораторных условиях.
3. Произведено измерение скорости распространения света со средней квадратичной погрешностью результата ± 5 км/сек и получено значение $C_0 = 299788$ км/сек.
4. Разработанный метод измерения скорости света с некоторыми изменениями в оптической схеме может быть впоследствии применен для измерения больших длин в геодезии.
5. Предложен новый метод наведения на интерференционные максимумы и штрихи с применением фотоэлектрической регистрации, внедрение которой в практику позволит повысить точность линейных измерений и исключить субъективные ошибки наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Birge, R. T., *Physics*, 8,90, (1941).
2. Michelson, *Aph. J.* 65, 1 (1927).
3. Розенберг Г., *УФН*, XLVIII, 4, 599 (1952).
4. Perrotin, *Annales des l'observatoire de Nice*, 11 (1908).
5. Anderson W. C., *J. O. S. A.*, 31, 3, 187 (1941).
6. Mittelstaedt, *Ann. d. Phys.*, 2, 3, 285 (1929).
7. Hüttel A., *Ann. d. Phys.*, 37, 5 и 6, 365 (1940).
8. Bergstrand E., *Arkiv för Fisik*, 3, 26, 479 (1951).

М. Л. БРЖЕЗИНСКИЙ

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПАРАТОР

Как известно, в настоящее время для измерения длины с высокой точностью применяется интерференция света. Существующие интерференционные компараторы дают возможность определять длину как расстояние между двумя зеркалами или параллельными плоскостями концевой меры. Эти компараторы не могут быть использованы для измерения штриховых мер, длина которых определяется как расстояние между осями двух штрихов.

Аттестация штриховых мер производится путем сличения их на компараторах со штриховыми мерами известного значения.

Сравнение концевых мер со штриховыми эталонами осуществляли по методу превращения концевой меры в штриховую (метод боковичков со штрихами) или с помощью продольного контактного компаратора. Исследования точности интерференционных методов измерения показывают, что этими методами длина концевых мер может быть определена с вероятной относительной погрешностью порядка $2 \cdot 10^{-8}$. Вероятную относительную погрешность компарирования штриховых мер (по итогам многолетних измерений) можно принять равной $1 \cdot 10^{-7}$, т. е. в пять раз большей погрешности интерференционных измерений. Переход от штрихового эталона к концевой мере упомянутым выше методом, может быть осуществлен с вероятной погрешностью порядка $0,2-0,3$ мк для метровых мер [1].

Таким образом, метрологическая практика располагает двумя существенно отличающимися по точности методами измерения штриховых и концевых мер.

Точность компараторных измерений во многих случаях уже не отвечает требованиям, предъявляемым приборостроительной и станкостроительной промышленностью к штриховым мерам.

Учитывая предстоящий переход на определение длины метра числом световых волн, а также требования промышленности к точным штриховым мерам, весьма актуальное значение приобретает вопрос об изыскании более совершенных методов перехода от концевых мер к штриховым и повышении точности компарирования штриховых мер.

Фирма К. Цейсс (Германия) сделала попытки применить интерференцию света для поверки шкал точных приборов, однако предложенный для этого метод [2] был реализован только в виде макета и, повидимому, дальнейшего практического применения не получил.

Для решения поставленных задач автор настоящей статьи предложил универсальный интерференционный компаратор [3], который дает возможность:

1. Слечь общую длину штриховой меры и отдельные ее подразделения с концевой мерой или трубчатым эталоном.

2. Компарировать штриховые меры, используя для измерения малых разностей высокоточные интерференционные отсчетные устройства и новые методы визирования штрихов.

3. Измерять концевые меры до 1000 мм в длинах световых волн.

1. Оптическая схема универсального интерференционного компаратора

Принципиальная схема предложенного универсального интерференционного компаратора представлена на рис. 1. Коллиматор, состоящий из деталей 1, 2, 3, 4, 5 и 6, дает параллельный пучок лучей, который, отразившись от зеркала 7, падает на разделяющую полупосеребренную пластинку 8. Часть лучей, пройдя сквозь эту пластинку и отразившись от второго вспомогательного зеркала 9, падает на зеркало 10, которое укреплено на одном блоке с тубусом микроскопа 11 и может перемещаться по направляющим станины в направлении падающего пучка лучей.

Лучи света, отраженные от зеркала 10, совершают обратный путь до разделяющей пластины 8, где, частично отразившись, попадают последова-

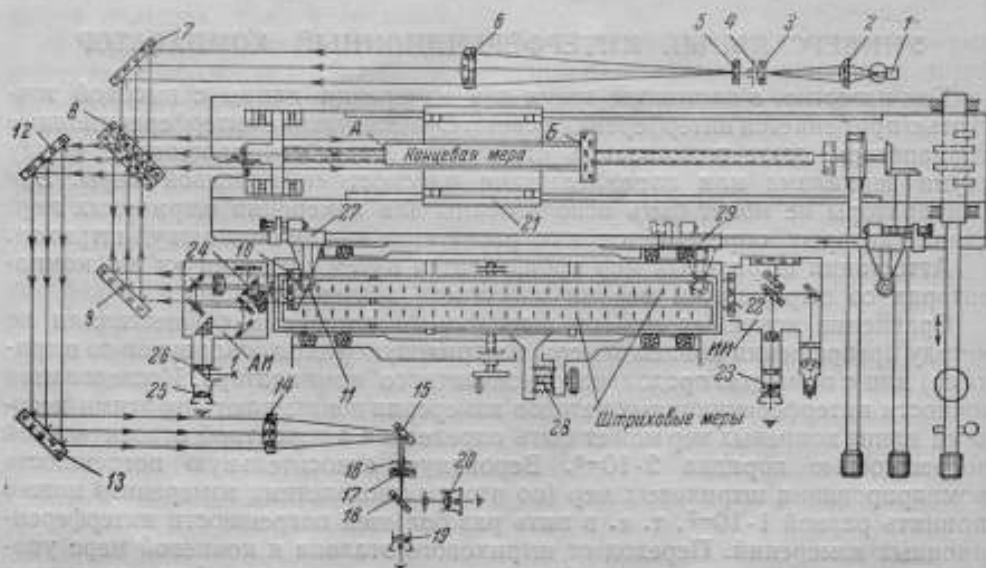


Рис. 1.

тельно на зеркала 12 и 13, после чего, поступают в наблюдательную трубу, состоящую из деталей 14, 15, 16, 17, 18, 19 и 20. Другая часть параллельного пучка, посылаемого коллиматором, отразившись от поверхности разделяющей пластинки 8, попадает одновременно и на свободную плоскость А концевой меры и на контактную плоскость Б, к которой притерта концевая мера. Отраженные от зеркальных плоскостей А и Б лучи пойдут обратно; пройдя частично через разделяющую пластинку 8 и отразившись от зеркал 12 и 13, они поступят в наблюдательную трубу. Соединившись при определенных условиях, эти два пучка будут интерферировать.

Концевую меру с контактной пластинкой (или трубчатый эталон) укрепляют на столике 21, который при помощи ходового винта и дополнительного механизма микроподачи может быть вместе с мерой перемещен в направлении пучка лучей. Штриховую меру устанавливают на каретке (одновременно могут быть установлены две штриховые меры), которая в небольших пределах имеет плавное и точное перемещение в направлении оси меры и пучка лучей. Для точной фиксации положения штриховой меры под микроскопами предусмотрены высокочувствительные отсчетные устройства (рис. 2): с правой стороны каретки — интерференционный индикатор ИИ, с левой — автоколлимационный индикатор АИ.

Интерференционный индикатор ИИ осуществлен по схеме интерферометра Майкельсона. Подвижное зеркало 22 жестко связано с торцевой плоскостью каретки и при ее перемещении относительно начального положения

(которое может быть зафиксировано в окуляре 23 по черной ахроматической интерференционной полосе) вызовет смещение черной интерференционной полосы, по величине которого и будет определено с высокой точностью перемещение каретки со штриховой мерой.

Автоколлимационный индикатор *АИ* соединяется с торцевой плоскостью каретки с помощью штифта, воздействующего на наклонное поворотное зеркало 24; поступательное перемещение каретки будет фиксироваться по шкале окуляра 25, нанесенной на пластинке 26.

Интерференционный индикатор используют для точных измерений, автоколлимационный — для менее точных, а также в тех случаях, когда разность между измеряемыми концевой и штриховой мерами будет настолько

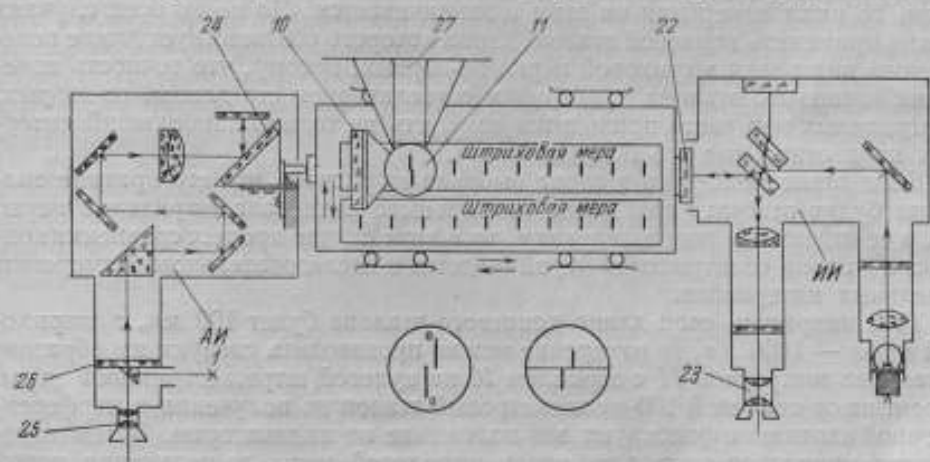


Рис. 2.

велика, что предела измерения интерференционного индикатора может оказаться недостаточно. Кроме того, оба измерителя можно применять одновременно, тем самым контролируя один другим.

2. Сличение штриховой меры с концевой

Чтобы точно зафиксировать положение нулевого штриха штриховой меры под микроскопом, необходимо переместить по направляющей станины бабку 27, на которой укреплены зеркало 10 и тубус микроскопа 11, используя винт микроподачи 28 (рис. 1) — каретки, и индикаторы *ИИ* и *АИ*. После этого, перемещая столик 21 с установленной концевой мерой, выравнивают оптическую длину путей двух пучков до появления интерференционной картины. Установив незначительный угол между зеркалом 10 и плоскостью меры, наблюдают интерференционные полосы равной толщины.

Как известно, в белом свете можно наблюдать черную ахроматическую интерференционную полосу, положение которой может быть зафиксировано относительно нитей сетки окуляра 20 зрительной трубы.

Таким образом, точное положение зеркала 10 фиксируют по средней ахроматической интерференционной полосе, а установку штриховой меры под микроскопом — по интерференционному или автоколлимационному индикаторам. Когда микроскоп был установлен на нулевой штрих меры, мы наблюдали интерференцию лучей, отраженных от зеркала 10 и от свободной поверхности концевой меры *А*; перемещая по направляющим вдоль оси штриховой меры бабку 27 с зеркалом 10 и микроскопом 11, найдем положение, при котором будут интерферировать пучки, отраженные от зеркала и контактной плоскости *Б* (при этом зеркало с микроскопом будут смещены на величину концевой меры). Если в этом положении нить окулярной

сетки микроскопа не совпадает с соответствующим штрихом штриховой меры, то, перемещая винтом микроподачи 28 каретку со штриховой мерой, совмещают штрих окулярной сетки микроскопа со штрихом меры, а величину смещения каретки (относительно ее первоначального положения) отсчитывают по интерференционному или автоколлимационному индикаторам.

Таким образом может быть определена разность между концевой мерой (выраженной в длинах световых волн) и соответствующим интервалом штриховой меры.

Если концевой эталон, с которым производится сравнение штриховой меры, имеет длину, соответствующую измеряемому интервалу штриховой меры, то цикл измерения на этом и заканчивается. Но не во всех случаях нужно применять концевой эталон, длина которого соответствует длине проверяемого интервала штриховой меры, во-первых, потому, что точность измерения концевой меры понижается с увеличением его длины, во-вторых, у штриховых мер часто приходится измерять не только наибольший интервал, но и отдельные его подразделения.

Если длина концевой меры выбрана из расчета, что его кратные значения будут отвечать как длине наибольшего интервала штриховой меры, так и ее отдельным подразделениям, то в этом случае процесс сравнения концевой меры со штриховой мерой сведется к последовательному измерению отдельных интервалов.

Так, например, если длина концевой меры будет 100 мм, а штриховой меры — 1000 мм, то измерение можно производить следующим образом: установив микроскоп *II* с зеркалом *10* на нулевой штрих штриховой меры, перемещают концевой 100-миллиметровый эталон до получения интерференционной картины и фиксируют это положение по индикаторам. Затем перемещают микроскоп с зеркалом вдоль штриховой меры до получения новой интерференционной картины (интерференция пучков: отраженного от зеркала *10* и контактной плоскости *Б*), совмещают штрих 100-миллиметрового интервала штриховой меры и снова отсчитывают по индикаторам *III* или *АИ*.

После этого перемещают каретку *21* с концевым эталоном до тех пор, пока снова не будет наблюдаться интерференция пучков, отраженных от подвижного зеркала *10* и свободной поверхности *А* концевой меры (это произойдет тогда, когда положение плоскости *Б* займет плоскость *А*), и снова перемещают зеркало *10* с микроскопом *II* до получения интерференции тех же пучков, но уже отраженных от зеркала и контактной плоскости *Б*, и т. д.

Перемещая концевой эталон и зеркало с микроскопом, можно сравнивать десятиметровые интервалы штриховой меры с концевым эталоном или длину метрового интервала с десятикратным значением 100-миллиметрового концевой меры. В этом случае на последних интервалах может иметь место накопление погрешностей; если при измерениях применить метод калибровки, накопленная погрешность может быть исключена. Если вместо обычного концевой меры применить трубчатый эталон Фабри и Перо, то можно использовать интерференцию пучков, получивших многократные отражения от его посеребренных зеркал, и тогда при измерении общей длины штриховой меры отпадает необходимость фиксировать положение зеркала *10* столько раз, сколько длина трубчатого эталона содержится в общей длине штриховой меры.

Используя многократные отражения лучей в трубчатом эталоне, можно зафиксировать положение подвижного зеркала два или три раза: в начале (на нулевом штрихе меры), в середине и в конце (на конечном штрихе).

Если применить монохроматический источник света и длину трубчатого эталона выразить числом волн, то этим методом можно установить число волн, укладывающихся на длине штриховой меры.

На каретке стола одновременно могут быть установлены две штриховые меры. При этом каждая может быть измерена по концевому эталону, или, как это будет видно из дальнейшего описания, эти штриховые меры можно сравнивать между собой.

3. Компарирование штриховых мер

При компарировании штриховых мер концевой эталон и интерференционная часть прибора в работе не участвуют. В этом случае в действие вводят второй микроскоп 29 (рис. 1), который устанавливают на конечный штрих меры или на штрих того интервала, который подлежит измерению. Микроскоп 11 оставляют на нулевом штрихе. Перемещая с помощью винта микроподдачи 28 стол с мерами, фиксируют по отсчетным индикаторам ИИ или АИ положение штрихов под микроскопами. После этого верхнюю платформу стола с мерами перемещают в поперечном направлении и под микроскопы подводят вторую штриховую меру, положение начального и конечного штрихов которой относительно тех же микроскопов также фиксируют по показаниям отсчетных устройств ИИ или АИ.

Для повышения разрешающей способности микроскопов 11 и 29 применяют отсчетную систему, дающую двойное изображение штриха. Как известно, две светящиеся точки или два параллельных штриха могут быть видны раздельно лишь тогда, когда расстояние между ними достигает значения порядка

$$\Delta l = \frac{0,5\lambda}{\cos \alpha}$$

где λ — длина волны, а α — апертурный угол.

Но два параллельных штриха, расположенных в поле окружности так, как это показано на рис. 2, могут быть видны раздельно при расстоянии между ними примерно в шесть раз меньшем. Двойное изображение штриха, наблюдаемое в поле зрения микроскопа (при помощи специальной призмы и диафрагмы), может быть срезано (см. рис. 2, правая окружность). В этом случае совмещение двух изображений можно производить по сечению в средней части штриха.

Совмещение двух изображений штриха меры осуществляют перемещением каретки и фиксируют до сотых долей микрона по интерференционному индикатору ИИ. При этом компарирование производят по методу, принципиально отличному от существующих, при которых: меры неподвижны; малые разности измеряются по винтовому окулярному микрометру, точность которого зависит от качества винта и определения цены деления барабана; наводка на штрихи меры производится по биссектору, ширина которого должна быть в определенном соотношении с толщиной штриха.

В предлагаемом методе малые разности измеряют по интерферометру, а у микроскопов в процессе компарирования сохраняют постоянное расстояние между оптическими осями. Установку на штрих меры производят не по биссектору, а по совмещению двух изображений одного штриха в среднем сечении его, а это, как уже было отмечено, может повысить разрешающую способность примерно в шесть раз. Точность визирования в этом случае не будет зависеть от толщины штриха.

Этим не исчерпываются возможности для повышения точности визирования на штрих. В последнее время получил применение метод фотоэлектрического визирования, который может быть легко использован в нашей установке.

4. Измерение длины концевых мер

Если в параллельном пучке света поместить трубчатый эталон (рис. 1), а подвижное зеркало 10 установить так, чтобы его плоскость делила измеряемую концевую меру на две части, кратные длине трубчатого эталона, то по наблюдению интерференционных полос перемещения можно

производить сравнение длины концевой меры с длиной трубчатого эталона по методу, предложенному и осуществленному в свое время М. Ф. Романовой и А. И. Карташевым [4].

Конструкторское бюро при ВНИИМ разработало проект компаратора (конструкторские и расчетные работы выполнены конструктором В. С. Сте-

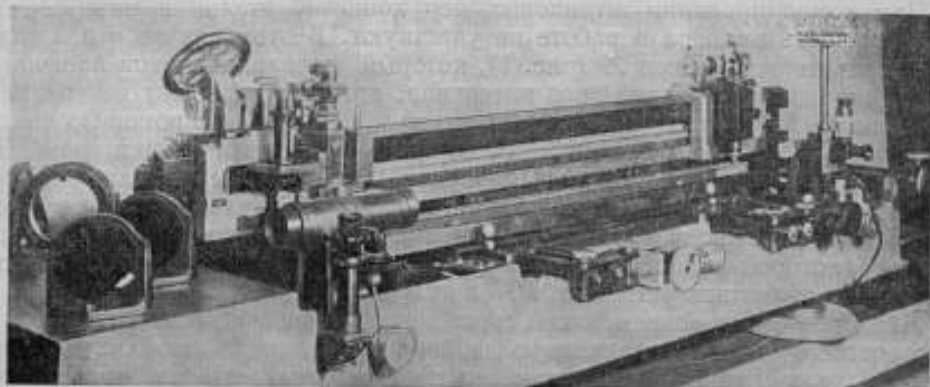


Рис. 3.

пановым при участии кандидатов технических наук А. Л. Курицкого и Н. Н. Губеля), опытная установка (рис. 3 и 4) изготовлена экспериментальным заводом «Эталон». В результате исследования установки были выявлены

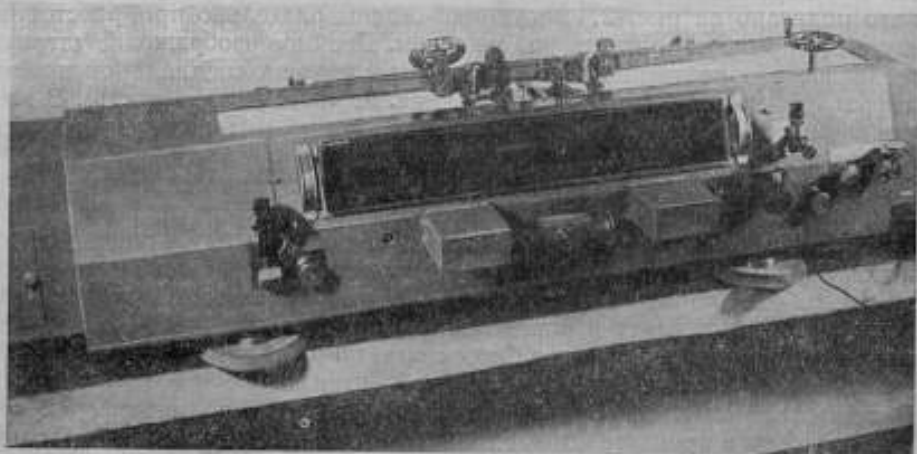


Рис. 4.

ошибки в конструкции некоторых узлов и неточности в изготовлении ответственных деталей. После устранения обнаруженных дефектов испытание установки показало возможность практического использования этого метода для компарирования штриховых и концевых мер с высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф., Волкова Е. А., Каяк Л. К., Труды ВНИИМ, вып. 16 (76), 1951, стр. 4.
2. Röntsch, R. Optik, Bd., 4, N 4/5, 1949, S. 285.
3. Бржезинский М. Л., авторское свидетельство 98120—1953.
4. Романова М. Ф., Карташев А. И., Труды ВНИИМ, вып. 7 (67), 1949, стр. 23.

Е. А. ВОЛКОВА, А. И. КАРТАШЕВ, М. Ф. РОМАНОВА и В. С. СТЕПАНОВ

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР СИСТЕМЫ ВНИИМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕВЫХ МЕР И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ КВАРЦЕВЫХ ЖЕЗЛОВ ДЛИНОЙ ДО 1200 мм

В современной машиностроительной промышленности при измерении калибров и деталей машин нашли широкое применение плоскопараллельные концевые меры длины. Для измерения длины исходных концевых мер используют абсолютный интерференционный метод, позволяющий производить сравнение длины мер с длиной световой волны с высокой точностью.

В интерференционных компараторах, применяемых для абсолютных измерений мер длиной до 175 мм, предел измерения обусловлен невозможностью наблюдать интерференционную картину полос равной толщины в свете монохроматических источников.

За последние десятилетия прогресс техники вызвал повышение требований к точности изготовления деталей с размерами порядка 200—1000 мм. Это повлекло за собой необходимость производства плоскопараллельных концевых мер длиной до 1000 мм.

В 1939 г. М. Ф. Романовой и А. И. Карташевым был предложен и разработан простой и точный метод, позволяющий производить сравнение концевых мер длиной свыше 175 мм с длиной световой волны [1]. Этот метод и был положен в основу создания интерференционного прибора для измерения исходных мер длиной до 1000 мм.

В 1941 г. оптической лабораторией ВНИИМ совместно с заводом «Эталон» был изготовлен большой горизонтальный интерферометр для измерения концевых мер длиной до 1000 мм [2]. Исследования прибора, проведенные в 1947 г. [2, 3], показали полную его пригодность для проведения этих измерений. Начиная с 1947 г. на этом интерферометре производились все поверки исходных концевых мер длиной свыше 175 мм, а также периодические сравнения эталона метра с длиной световой волны [4]. В настоящее время, когда число исходных мер длиной свыше 175 мм сильно возросло, единственный в Советском Союзе прибор не может уже обеспечивать своевременной их поверки.

Применение интерференции света в практике геодезического компарирования привело к созданию специальных концевых мер из плавленого кварца. Размер этих мер определяется расстоянием между отражающими плоскими поверхностями кварцевых зеркал, притертых к кварцевому стержню и образующих ступенчатую концевую меру. Такая мера — кварцевый геодезический жезл, — длиной 1200 мм, являющаяся исходной для компарирования 24-метровых геодезических мерных проволок сравнительным интерференционным методом [5], должна быть измерена с высокой степенью точности непосредственно в длинах световых волн [6]. До настоящего времени стационарного интерферометра для измерения длины геодезических жезлов

не существовало. Конструктивные же особенности большого горизонтального интерферометра ВНИИМ (размеры поля зрения и каретки для установки мер), рассчитанного для измерения концевых мер в виде плоскопараллельных плиток, не позволяют производить на приборе измерения кварцевых геодезических жезлов.

Все вышесказанное послужило основанием для создания нового универсального интерферометра, на котором можно было бы производить как поверку концевых мер длиной до 1000 мм, так и поверку геодезических кварцевых жезлов. В настоящей статье изложены принципы оптической схемы и конструктивные особенности нового интерферометра.

1. Принципиальная схема универсального интерферометра

Учитывая опыт работы с большим горизонтальным интерферометром, в 1950 г. в оптической лаборатории были разработаны принципиальная схема нового интерферометра и технические условия на его конструирование.

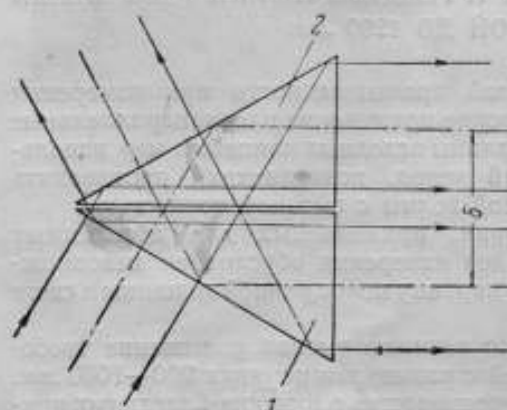


Рис. 1.

Как показало исследование большого горизонтального интерферометра, термостатирование прибора имеет чрезвычайно важное значение при измерении концевых мер. Местный термостат большого горизонтального интерферометра обеспечивает поддержание постоянства температуры в требуемых пределах лишь в условиях термоконстантной комнаты. Для того чтобы на новом приборе можно было производить измерения в обычных лабораторных помещениях, необходимо было создать новый, более совершенный местный термостат. Так как габариты интерферометра достаточно велики, то возможны температурные градиенты вдоль мер (особенно для мер длиной 500—1000 мм) и между мерой и трубчатым эталоном. Наличие указанных температурных градиентов может привести к систематическим погрешностям в определении длины меры.

В технических условиях на конструирование нового прибора подчеркивалось, что при создании интерферометра необходимо обеспечить надежность термостатирования и компактность расположения всех его частей. Расположение отдельных элементов прибора в основном зависит от конструкции разделяющего световой пучок устройства и его размеров.

Размеры зеркал геодезического жезла составляют 60×75 мм, поэтому диаметр световых пучков интерферометра должен быть не менее 50 мм, а расстояние b (рис. 1) между двумя разделяющими пучками, выходящими из разделяющего устройства, должно быть порядка 80 мм.

Разделяющее устройство горизонтального интерферометра, выполненное в виде призмы, состоящей из двух частей (рис. 1), позволяет наблюдать интерференционные полосы в белом свете с одной ахроматической полосой только при весьма точном изготовлении призмы. Обе ее части должны быть сделаны из одного куска однородного стекла и иметь одинаковые размеры и углы; поверхности призм должны иметь отступления от плоскости, не превышающие $0,05$ мк. Высокая точность изготовления призм вызвана тем, что, как известно, интерференционные полосы в белом свете с ахроматической полосой можно наблюдать при малых разностях хода интерферирующих пучков (до 2 мк). При этом для всех длин волн белая ахроматическая полоса

соответствует разности хода, равной нулю, черная — разности хода, равной половине длины волны ($\frac{\lambda}{2}$).

Интерференционная картина представляет собой ахроматическую полосу (белую или черную), по обе стороны от которой симметрично расположены окрашенные полосы. При изменении пути лучей в воздухе в одной из ветвей интерферометра симметричность окраски не нарушается; наблюдается лишь общее смещение картины. При постепенном увеличении пути одного из интерферирующих лучей в стекле белая полоса постепенно переходит в черную (разность хода достигает $\frac{\lambda}{2}$), затем черная полоса приобретает несимметричную окраску, снова становится белой (полоса первого порядка, разность хода равна λ) и т. д. При переходе от нулевых полос к полосам следующего порядка нарушается симметричность окраски в интерференционной картине. Это нарушение будет тем больше, чем большей дисперсией обладает стекло.

Таким образом, вводя добавочный слой стекла в одну из ветвей интерферометра, мы можем получить несколько «белых» и несколько «черных» ахроматических полос, совершенно похожих друг на друга. В таком случае при совмещении ахроматических полос двух интерференционных картин, наблюдаемых в поле зрения интерферометра, можно допустить ошибку на целый порядок. Точное совмещение ахроматических полос одного и того же порядка является необходимым условием для установления равенства длины меры длине трубчатого эталона, увеличенной в n раз [3].

Если в новом приборе со световым диаметром пучков, равным 50 мм, выполнить разделяющее устройство в виде призмы, то длина стороны при угле 30° (рис. 1) будет составлять около 140 мм. Изготовление подобных призм связано со значительными технологическими трудностями. Поэтому было решено заменить призму системой из двух плоскопараллельных стеклянных пластин ba и bb , одна из внутренних поверхностей которых полупосеребрена, и двух зеркал 5 и 7 с наружным алюминированием (рис. 2).

Расположение пластин и зеркал позволяет установить в приборе, как и при применении призмы, трубчатый эталон и меру параллельно и в непосредственной близости друг от друга. При такой конструкции разделяющего устройства два интерферирующие пучка проходят в стекле значительно меньший путь, чем в случае применения призмы. Равенство оптических длин лучей в стекле может быть получено в результате изготовления пластин одинаковой толщины и правильного расположения пластин и зеркал. Уравнивать оптические пути лучей в воздухе в пределах самого разделяющего устройства не обязательно, так как неравенство оптической длины одного из лучей может быть компенсировано соответствующим расположением относительного зеркала 8 (рис. 3), что упрощает юстировку разделяющего устройства. Пластины и зеркала последнего должны быть укреплены в единой оправе, позволяющей производить юстировку и жесткое закрепление деталей. В дальнейшем этот узел прибора будем называть «блоком зеркал». Схема нового универсального интерферометра приведена на рис. 3.

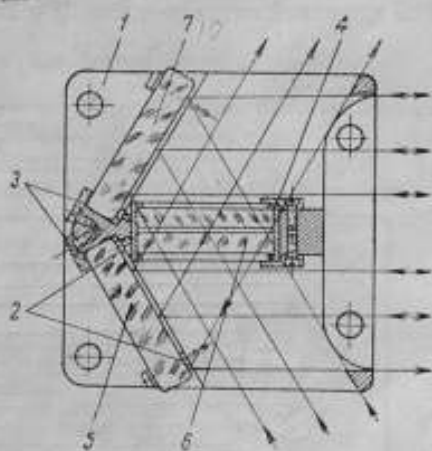


Рис. 2.

Ход лучей при измерениях длины интерференционного эталона и длины меры следующий:

1. При измерении длины трубчатого эталона 3 свет от монохроматического источника фокусируется на входную щель монохроматора (на рисунке монохроматор не показан), проходит через нее и падает на плоское зеркало 27, откуда направляется на щель 1, расположенную в фокальной плоскости объектива коллиматора 2. Выходящий из коллиматора параллельный пучок лучей проходит через трубчатый эталон 3, претерпевает многократные отражения от его зеркал и плоскими зеркалами 22 и 24 направляется в объектив камеры, с помощью которой фотографируют интерференционные кольца равного наклона.

2. При сравнении длины трубчатого эталона с длиной плоскопараллельной концевой меры зеркала 22 и 27 отводят в сторону. Параллельный пучок

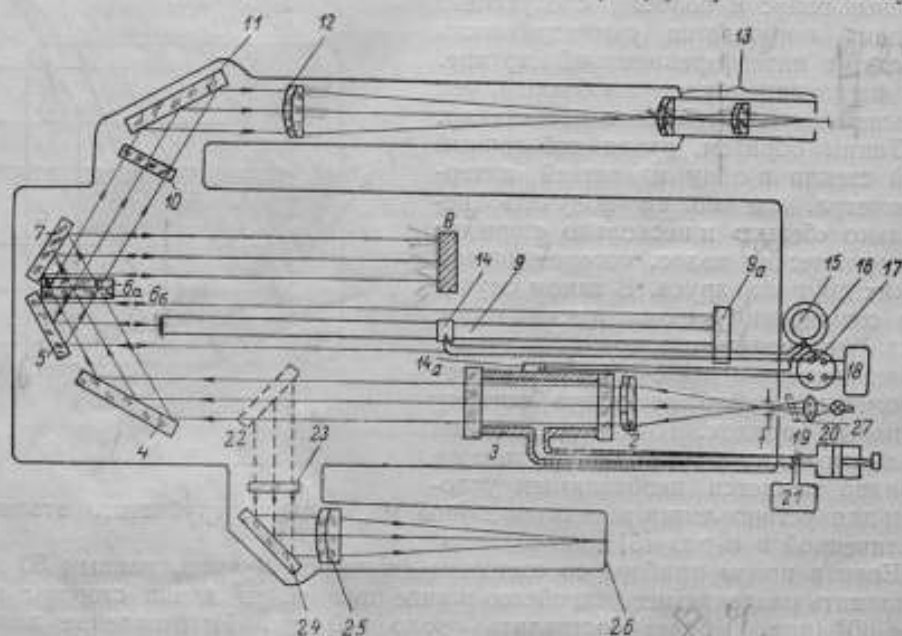


Рис. 3.

световых лучей от лампочки накаливания после прохождения через трубчатый эталон падает на зеркало 4, откуда направляется на полупосеребренную разделяющую поверхность пластины 66 блока зеркал, где делится на проходящий и отраженный пучки лучей. Первый пучок лучей после отражения от зеркала 7 падает на относительное зеркало 8 и, возвращаясь по тому же пути обратно, попадает на разделяющую поверхность пластины 66, отразившись от которой, идет к зеркалу 11. Второй пучок, после отражения от полупосеребренной поверхности пластины 66, отражается от зеркала 5, падает на свободную поверхность меры 9 и поверхность притертой к ней пластины 9а. Возвращаясь обратно после прохождения через пластину, второй пучок встречается с первым, вместе с ним идет к зеркалу 11 и далее в наблюдательную систему, состоящую из объектива 12 и зрительной трубы 13. Для измерения температур меры и трубчатого эталона в универсальном интерферометре предусмотрены две дифференциальные медноконстантановые термодпары. Один из спаев каждой термодпары (14 и 14а) установлен на поверхностях меры и эталона, а другой — в виде кольца 16 находится в соприкосновении с резервуаром calorиметрического термометра 15. Для измерения термоэлектродвижущей силы служит гальванометр 18 с переключателем 17.

Изменение оптической длины эталона производится с помощью насоса 20 с трехходовым краном 19. Микроманометром 21 измеряют изменения оптической длины эталона 3.

В отличие от схемы большого горизонтального интерферометра в схеме нового интерферометра трубчатый эталон расположен значительно ближе к измеряемой мере; наблюдательные и осветительные системы вынесены за пределы местного термостата. Такое расположение элементов прибора делает более компактной ту часть интерферометра, которая должна быть заключена в местный термостат и уменьшает возможные температурные градиенты между мерой и трубчатым эталоном.

В соответствии с техническими условиями в конструкторском Бюро при ВНИИМ было выполнено конструирование прибора. Оптическую часть прибора рассчитали Н. Н. Губель и А. Л. Курицкий.

2. Описание конструкции отдельных элементов интерферометра

На рис. 4 представлен общий вид прибора, а на рис. 5 схема расположения отдельных элементов интерферометра в разрезе.

Все основные детали прибора — трубчатый эталон 5, блок зеркал 3, относительное зеркало 12 — укреплены на массивной станине 2, которая

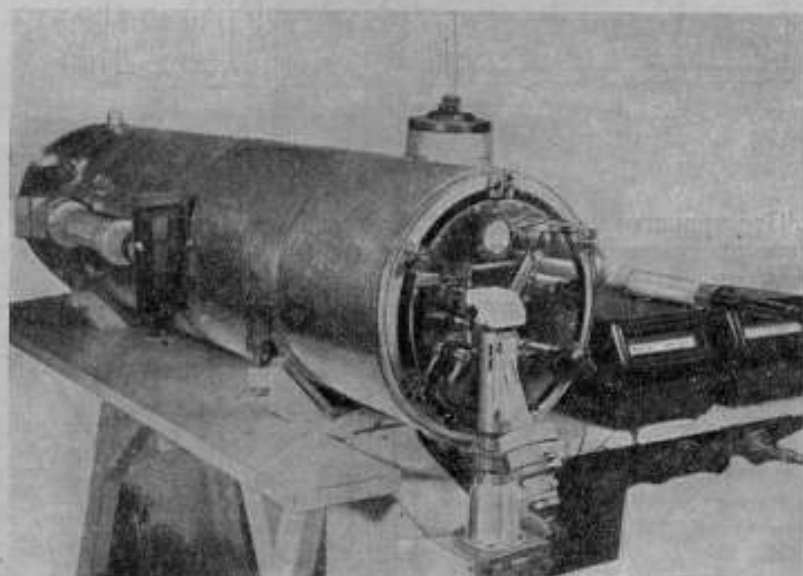


Рис. 4.

установлена на направляющих внутри местного термостата 1. Между трубчатым эталоном 5 и относительным зеркалом устанавливается на специальной каретке мера 4.

На наружной стенке термостата 1 укреплена наблюдательная система 13 и фотокамера 14. На передней торцевой крышке 8 расположены рукоятки управления 6 и входная щель прибора 7. Непосредственно под термостатом интерферометра установлен монохроматор 9 и источник монохроматического света 10. На столе прибора с правой стороны от наблюдателя помещены гальванометр 15 (для системы терморпар меры и эталона) и микроманометр 16 с насосом 17.

Укажем на особенности конструкции некоторых узлов прибора.

Термостат 11 представляет собой длинный полый цилиндр, в котором установлена станина интерферометра. Симметричная форма термостата

обеспечивает равномерное распределение температуры в его внутреннем пространстве. Наружный диаметр термостата приблизительно 350 мм, длина 1400 мм. Между внутренней и средней стенками термостата создана герметическая камера, через которую можно пропускать воду из ультратермостата, поддерживая таким образом постоянную температуру внутри ци-

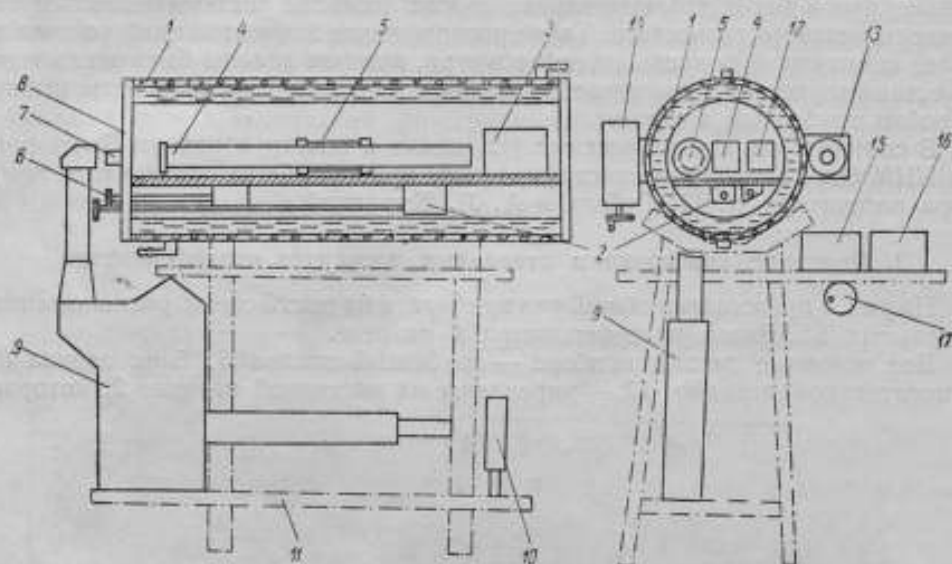


Рис. 5.

линдра. Пространство между средней и наружной стенками термостата, так же как и пространство между стенками его торцевых крышек, заполнено теплоизоляционным материалом — стеклянной ватой. Термостат лежит в горизонтальном положении на двух металлических призмах с деревянными тепло-

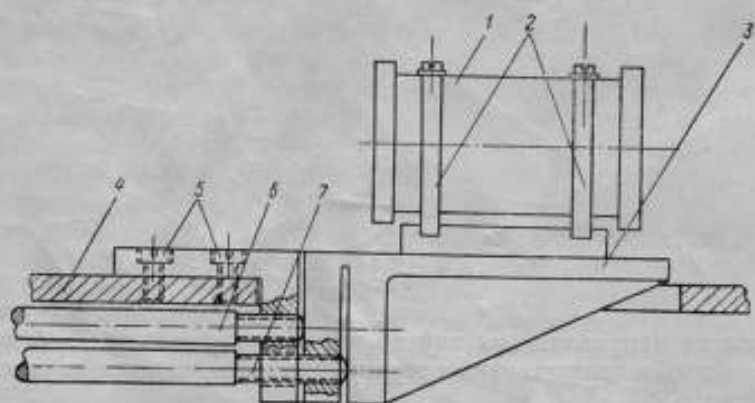


Рис. 6.

изолирующими прокладками и укреплен тягами с болтами. Металлические призмы представляют собой верхнюю часть прочного стального стола 11 сварной конструкции.

На рис. 6 представлена схема крепления трубчатого эталона.

Трубчатый интерференционный эталон 1 расположен на двух призматических опорах 2, укрепленных на горизонтальной прямоугольной подставке 3. Последняя установлена своей крайней частью на плоскость станины 4 и укреплена винтами 5. Нижняя часть подставки 3 расположена в прямоуголь-

ном отверстия, прорезанном в станине 4. Под станиной подставка имеет выступ с вертикальной опорной плоскостью. Юстировочные винты 6 и 7, идущие вдоль станины, позволяют в результате малых упругих деформаций подставки 3 изменять положение эталона 1. Система управления этими винтами выведена под станиной к задней торцевой крышке термостата.

Подобное устройство создано и для юстировки относительно зеркала. Продольное перемещение этого зеркала осуществляется с помощью устройства в виде упругого параллелограмма (рис. 7), состоящего из двух стальных горизонтально расположенных жестких рамок 3 и 4, скрепленных между собой вертикальными плоскими пружинами 5 и 6. Нижняя рамка 4 укреплена на станине 8 так же, как и подставка для эталона. Создавая давление на верхнюю рамку 3 с помощью винта 9, идущего вдоль станины, вызывают упругий изгиб плоских пружин (сторон параллелограмма), плавно передвигающих относи-

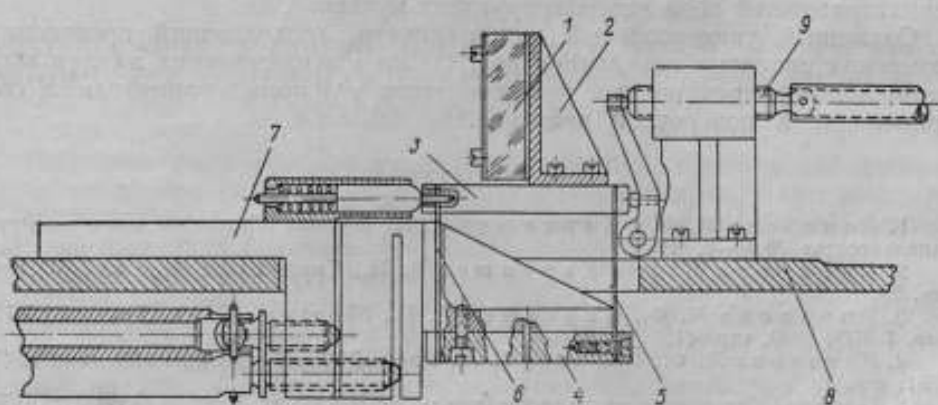


Рис. 7.

тельное зеркало 1. При этом плоскость зеркала должна оставаться параллельной своему первоначальному положению.

Оправой блока зеркал, в которой закреплены зеркала и пластины, служит массивная стальная рама 1 (рис. 2), изготовленная из одного куска металла. Положение каждого из зеркал 5 и 7 фиксируется головками трех винтов 2, плотно ввинчиваемых в корпус рамы. Неподвижность зеркал обеспечивается тремя планками 3, прижимающими зеркала к опорным винтам 2. Разделяющая и компенсирующая пластины *бб* и *ба* расположены на небольшом расстоянии друг от друга (около 0,15 мм), постоянство которого обеспечено тем, что на внутренних поверхностях обеих пластин на оптическом контакте установлены маленькие стеклянные плоскопараллельные пластинки одинаковой толщины. Скрепленные таким способом пластины устанавливаются в оправу 4 и укрепляют ее в корпусе 1. Такая конструкция блока зеркал позволяет выполнить сборку и юстировку его перед креплением на станину интерферометра.

Для установки измеряемой меры на приборе служит специальная каретка, которая вместе с мерой вводится через окно в передней торцевой крышке термостата (на роликах по направляющим станины) в центр цилиндра термостата. Соответствующим механизмом можно освободить каретку от роликов и установить на шариках двух регулируемых опор. Путем изменения положения опор осуществляется регулировка меры по высоте и по азимуту. В переднюю торцевую крышку термостата выведены концы четырех штанг, идущих вдоль станины и служащих для управления прибором. Штанги снабжены небольшими рукоятками с накаткой, поворот которых позволяет:

1. Включать и выключать с помощью механических рычагов зеркало, направляющее световые лучи в фотокамеру при фотографировании интерференционных колец равного наклона, получаемых в трубчатом эталоне.

2. Производить горизонтальные и вертикальные повороты меры (двумя рукоятками) при ее установке.

3. Перемещать относительное зеркало в продольном направлении для получения в поле зрения прибора интерференционной картины полос переналожения.

В универсальном интерферометре (подобно тому, как и в большом горизонтальном интерферометре) с помощью поршневого насоса можно изменять в небольших пределах давление внутри трубчатого эталона (приблизительно 80 мм рт. ст. в сторону разряжения). Это изменение давления регистрируется микроманометром с точностью до 0,1 мм рт. ст. Чувствительным элементом микроманометра служит мембранная коробка, связанная с рычажно-оптической системой, аналогичной системе переносных зеркальных гальванометров типа ГПЗ. Шкала микроманометра градуируется непосредственно в значениях разностей хода интерферирующих пучков.

Созданный универсальный интерферометр, позволяющий производить измерения концевых мер длиной до 1000 мм и геодезических жезлов абсолютным интерференционным методом, после его исследования нашел себе применение в поверочной практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф. и Карташев А. И., Журнал «Оптико-механическая промышленность» № 6—7, 1939.
2. Романова М. Ф. и Карташев А. И., Труды ВНИИМ, вып. 7 (67), 1949, стр. 23.
3. Романова М. Ф., Карташев А. И., Шошина О. Ю., Труды ВНИИМ, вып. 7 (67), 1949, стр. 41.
4. Романова М. Ф., Волкова Е. А., Каяк Л. К., Труды ВНИИМ, вып. 16 (76) 1951, стр. 4.
5. Геодезия, Справочное руководство под редакцией Н. Н. Степанова, Гостехиздат, т. IX, 1949.
6. Назаров В. М., Труды ЦНИГАиК, «Исследования по геодезии», вып. 85, 1951, стр. 123.

Е. А. ВОЛКОВА и И. П. ВЛАДИМИРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА СИСТЕМЫ ВНИИМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕВЫХ МЕР И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЖЕЗЛОВ ДЛИНОЙ ДО 1200 мм

Исследования, произведенные за последние годы в оптической лаборатории по измерению длины плоскопараллельных концевых мер, показали целесообразность создания нового универсального интерферометра, работающего по принципу большого горизонтального интерферометра ВНИИМ [1] и предназначенного для измерения концевых мер и геодезических кварцевых жезлов длиной до 1200 мм. При разработке проекта универсального интерферометра¹ в его оптическую схему было введено новое разделяющее устройство в виде блока зеркал (рис. 1).

В настоящей статье дано описание экспериментальных работ по исследованию конструкции этого разделяющего устройства, выполненных в оптической лаборатории ВНИИМ перед изготовлением прибора, а также указан метод юстировки универсального интерферометра и приведены результаты его исследования, полученные непосредственно после изготовления.

Точность изготовления деталей блока зеркал и его юстировка должны были обеспечить возможность наблюдения с помощью этого разделяющего устройства прямых интерференционных полос переналаживания в белом свете с одной ахроматической полосой. Для того чтобы неполная ахроматизация ахроматической полосы была мало заметной для глаза, разность хода лучей с длиной волны $\lambda = 0,4861 \text{ мк}$ не должна отличаться от разности хода лучей с длиной волны $\lambda = 0,6563 \text{ мк}$ более чем на $0,2 \lambda$.

Исходя из этого можно подсчитать допустимую разность оптических

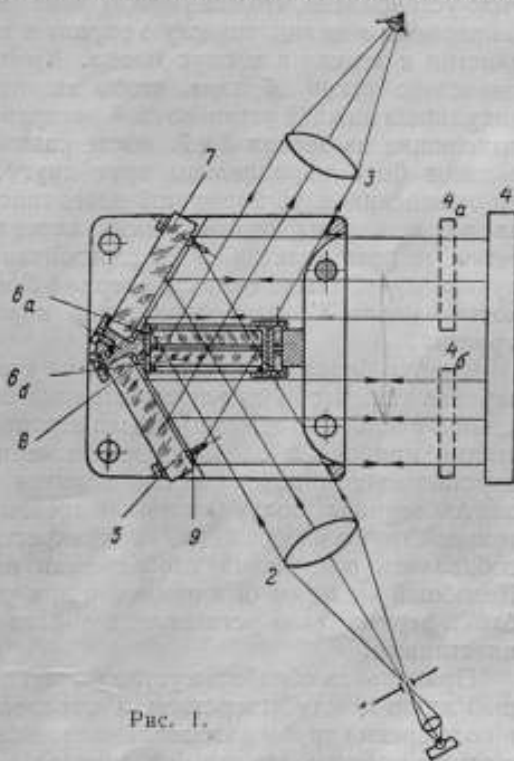


Рис. 1.

¹ См. статью настоящего сборника стр. 43.

путей в стекле для двух интерферирующих пучков [2]. Расчет показывает, что если разделяющая и компенсирующая пластины изготовлены из стекла К-8 с толщинами 10 мм (разность этих толщин не более $\pm 0,001$ мм), то можно допустить при установке пластин в оправу отступление от параллельности их поверхностей, не превосходящее $1''$.

Исследование оптических деталей блока зеркал, изготовленных в оптической лаборатории, показало, что отступления от плоскости поверхностей пластин и зеркал не превышают 0,03 мк; пластины были изготовлены из одного куска стекла и равны по толщине (разность толщин не превосходила 0,001 мм).

Сборка и юстировка блока зеркал были произведены следующим образом. Прежде всего на зеркала 5 и 7 были нанесены отражающие слои алюминия методом испарения в вакууме (коэффициент отражения около 85%), а на разделяющую пластину 6б был нанесен слой серебра методом катодного распыления (отражение и пропускание слоя примерно равны друг другу). Затем с части поверхности разделяющей пластины был снят слой серебра, так что образовались три прозрачных треугольника со сторонами около 8 мм, расположенные по краю пластины под углом 120° . На эти места были посажены на контакт малые стеклянные пластинки 8, на которые была установлена на контакт компенсирующая пластина 6а. Таким образом разделяющая и компенсирующая пластины были жестко соединены.

Наблюдением полос равной толщины в воздушном слое между пластинами было установлено, что клин между ними не превышал $1''$. Затем пластины были закреплены в цилиндрическую оправу и после этого приступили к установке пластин и зеркал в корпус блока. Крепление этих деталей должно быть выполнено таким образом, чтобы их отражающие плоскости были перпендикулярны нижней установочной поверхности корпуса блока и пучки лучей, выходящие из зеркал 5 и 7, после разделения на поверхности пластины 6б должны быть параллельны друг другу. Ориентировка пластин и зеркал по отношению к установочной поверхности должна обеспечить наименьший наклон между их отражающими поверхностями в вертикальном направлении, не превышающий $2''$. В горизонтальном сечении блока параллельность пучков лучей, выходящих из зеркал 5 и 7, должна быть выдержана с точностью около $3'$, что обусловлено конструктивными данными интерферометра.

Корпус блока был установлен на столик гониометра, отъюстированный заранее так, чтобы плоскость столика была перпендикулярна его оси вращения, после чего зеркало 7 было поставлено в корпусе блока. Поворачивая столик прибора и одновременно изменяя угол, образованный зеркалом 7 с установочной поверхностью корпуса, путем изменения длины опорных винтов зеркала, получили в поле зрения окуляра автоколлимационной зрительной трубы изображение ее перекрестия от зеркала 7. Таким же способом добивались совпадения изображения перекрестия с самим перекрестием. Подобный же метод был применен при установке зеркала 5. Затем в корпус блока зеркал была установлена оправка с разделяющей и компенсирующей пластинами.

Правильная обработка установочного отверстия в корпусе блока и небольшой зазор между отверстием и оправкой позволили почти сразу получить в поле зрения трубы автоколлимационное изображение креста, совпадающее с самим крестом. На этом первоначальная установка деталей блока была закончена. Блок зеркал был снят со столика гониометра и для дальнейшей юстировки была собрана установка, схема которой приведена на рис. 2. Из объектива автоколлимационной зрительной трубы 3 параллельный пучок лучей падает на поверхность пластины 6б и делится на два пучка — проходящий и отраженный. Эти пучки после отражения от зеркал 7 и 5 падают на плоское зеркало 4. Установка последнего должна позволить наблюдать в окуляр два автоколлимационных изображения перекрестия трубы, горизонтальные линии которых совпадают. Последовательной подшлифовкой длины опорных

винтов зеркал 5 и 7 добивались того, чтобы угловое расстояние между вертикальными линиями изображений перекрестия было меньше $3'$ (при этом горизонтальные линии изображений совпадали). После закрепления зеркал юстировка блока была закончена.

Для проверки отсутствия деформаций (от крепления) у пластин и зеркал блока снова производили исследование их поверхностей. Для этого с помощью блока наблюдали полосы равной толщины. На разделяющую пластину блока зеркал (рис. 1) из объектива коллиматора 2 падает параллельный пучок монохроматических лучей. Перед двумя пучками лучей, выходящими из блока, установлено плоское зеркало 4, поверхность которого имеет отступления от плоскости, не превышающие $0,03 \text{ мк}$. Незначительными поворотами зеркала 4 совмещали изображения щели коллиматора, получаемые от зеркал блока 5 и 7. Тогда в поле зрения лупы, при установке глаза наблюдателя в ее фокусе, можно было наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Отсутствие искривлений в полосах показывало, что зеркала и пластины не деформировались при креплении.

Затем исследовали блок зеркал при наблюдении интерференционных полос в белом свете. С этой целью монохроматический источник света был заменен лампой накалывания. Интерференционные полосы из поля зрения лупы исчезли. Повидимому, поверхность разделяющей пластины 6б была установлена недостаточно симметрично по отношению к зеркалам 5 и 7. Поэтому для наблюдения полос в белом свете на пути двух пучков лучей вместо зеркала 4 были установлены два плоских зеркала 4а и 4б. Одно из зеркал можно было передвигать относительно другого (вдоль падающего пучка лучей) и наблюдать появление интерференционной картины. Полосы в белом свете были видны в том случае, если зеркало 4а расположено на $2,5 \text{ мм}$ ближе к блоку зеркал, чем зеркало 4б. Окраска наблюдаемой интерференционной картины была симметричной и ахроматическая полоса резко выделялась среди других полос. Следовательно, как указано ¹, добавочный слой воздуха в одном из интерферирующих пучков не меняет симметрии окраски картины и поэтому блок зеркал в таком виде вполне пригоден для установки в интерферометре. Расстояние $2,5 \text{ мм}$ в дальнейшем при сборке и юстировке интерферометра было учтено.

Для уменьшения потерь при отражении света от поверхностей оптических деталей интерферометра последние были просветлены в оптической лаборатории путем нанесения пленки фтористого магния при испарении его в вакууме.

Трубчатый интерференционный эталон был изготовлен в оптической лаборатории с высокой точностью ². Исследование поверхностей зеркал эталона показало, что они имеют отступления от плоскости, не превосходящие $0,015 \text{ мк}$, а параллельность установки зеркал выполнена с погрешностью порядка $0,03 \text{ мк}$. Коэффициент отражения зеркал эталона достигал 90% , пропускания — 5% .

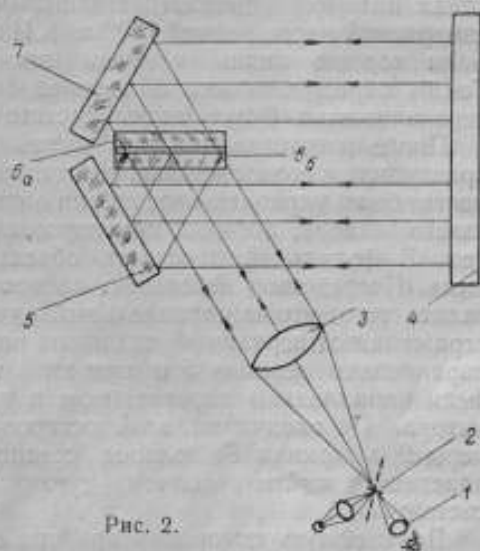


Рис. 2.

¹ См. статью настоящего сборника (стр. 43).

² См. статью настоящего сборника (стр. 56).

В разделяющем устройстве в виде блока зеркал имеют место дополнительные потери света (по сравнению с разделяющей призмой большого горизонтального интерферометра ВНИИМ) при отражении лучей от алюминированных зеркал. Поэтому экспериментально была проверена видимость полос переналожения при применении блока зеркал. С этой целью до изготовления универсального интерферометра была собрана оптическая система, воспроизводящая его схему¹. После юстировки этой установки на нее была поставлена концевая мера длиной 700 мм с притертой к ее поверхности стальной пластиной.

Расстояние от поверхности пластины до поверхности относительного зеркала соответствовало 600 мм, а расстояние от передней поверхности меры до зеркала — 100 мм. Такая установка меры позволяла наблюдать полосы переналожения на поверхности пластины при двенадцати отражениях в зеркалах интерференционного эталона (что соответствует номинальной длине измеряемой меры, равной 1200 мм). Интерференционные полосы на пластине были хорошо видны и среди них была одна ахроматическая полоса. Таким образом, можно было предполагать, что в новом приборе полосы переналожения будут видны достаточно отчетливо.

После изготовления всех частей интерферометра на заводе «Эталон» приступили к его юстировке. На станине прибора до установки в местный термостат были укреплены все детали оптической системы за исключением трубчатого эталона, который при первоначальной юстировке должен быть удален. В фокальной плоскости объектива коллиматора была установлена щель. Посредством небольших поворотов зеркала 4² и блока зеркал добивались того, чтобы параллельный пучок, вышедший из коллиматора, после отражения от зеркала 4 падал на разделяющую пластину блока зеркал параллельно зеркалу 5 и при этом пучки лучей, выходящие из блока, были параллельны каретке меры и пучку лучей, выходящему из коллиматора. По окончании этой юстировки два пучка лучей, отраженные от меры 9 и зеркала 8, должны соединиться на поверхности разделяющей пластины и выйти по одному и тому же направлению в наблюдательную систему.

Дальнейшую юстировку прибора производили после крепления трубчатого интерференционного эталона на опорных призмах. Путем изменения положения подставки эталона устанавливали поверхности его зеркал перпендикулярно к падающим лучам. Правильность положения эталона проверяли наблюдением совпадения изображения щели от зеркала с самой щелью в автоколлимационный окуляр, поставленный со стороны щели 1.

Для того чтобы наблюдение полос переналожения позволяло производить сравнение длины эталона с длиной меры, определяемой ОСТ 85000—39, необходимо, чтобы плоскость зеркала 8, так же как плоскости зеркал эталона, была расположена перпендикулярно к падающим лучам. Погрешность установки должна быть не более 10°. Зеркала эталона изготовлены из стеклянных пластин толщиной около 15 мм, плоскости которых составляют между собой угол порядка 10' (для устранения побочных отражений от наружных поверхностей зеркал). Следовательно, после прохождения через эталон пучок лучей изменит свое направление. Соответственно этому изменится угол падения лучей на зеркало 8. Изменяя положение этого зеркала с помощью юстировочных винтов, добились того, чтобы изображение щели коллиматора, рассматриваемое с помощью объектива 12 и лупы, не имело в непосредственной близости побочных, менее интенсивных изображений щели от поверхностей зеркал трубчатого эталона. Это показывало, что зеркало 8 установлено перпендикулярно падающим лучам. Фокусное расстояние объектива 12 равно 1000 мм, поэтому при применении лупы с увеличением 3×

¹ См. рис. 3 на стр. 46 настоящего сборника.

² То же

можно было установить поверхность относительного зеркала с погрешностью, не превышающей $10''$.

Качество юстировки было проверено наблюдением полос переналожения для меры наименьшей длины (100 мк). При этом на поверхности меры наблюдали интерференционные полосы равной толщины, а на поверхности пластины — полосы переналожения, контрастность которых должна быть очень близка к контрастности полос равной толщины.

На этом была закончена предварительная юстировка интерферометра, после чего прибор был установлен в местный термостат. Во время окончательной юстировки была еще раз проверена правильность установки зеркала δ указанным выше методом и для качественной оценки юстировки повторено наблюдение полос переналожения при длине мер 100 и 700 мк (последнюю устанавливали так, как это было указано при исследовании блока зеркал).

При юстировке прибора было обнаружено, что узел относительного зеркала δ изготовлен недостаточно надежно; при передвижении этого зеркала его плоскость не всегда оставалась параллельной своему первоначальному положению и перед измерением иногда приходилось производить дополнительную юстировку зеркала. Конструкция этого узла должна быть изменена.

По окончании юстировки интерферометра были произведены градуировка термомпар с гальванометром для измерения температур меры и трубчатого эталона и градуировка шкалы микроманометра. Значение градуировочного коэффициента термомпар было установлено равным $0,009^\circ \text{C}$ на одно деление шкалы гальванометра. Для микроманометра была получена плавная кривая зависимости его показаний от изменения оптической длины трубчатого эталона. Средняя цена одного деления шкалы микроманометра составляла около $0,025 \text{ мк}$ изменения оптической длины трубчатого эталона.

Как было указано¹, местный термостат прибора, выполненный в виде горизонтального цилиндра, имеет между внутренней и наружной стенками воздушную камеру. Эта же камера может быть заполнена проточной водой, подаваемой из ультратермостата ТС-15 и имеющей постоянную температуру.

Исследование универсального интерферометра было начато с изучения температурного режима в нем без ультратермостата и с применением последнего. В первом случае было установлено, что если в помещении, где расположен интерферометр, имеется переменный температурный режим со скоростью изменения температуры порядка 1°C в час, то в приборе температура меняется вдвое медленнее, чем в комнате. При приключении ультратермостата после 6—8 часов интерферометр приходит в температурное равновесие и температура в приборе поддерживается постоянной (скорость ее изменения не превышает $0,05^\circ \text{C}$ в час).

Исследование показало, что местный термостат интерферометра дает возможность получить при измерениях достаточно стабильную температуру. Дальнейшие исследования прибора производились путем выполнения на нем измерений. При этом прибор был установлен в помещении без специальных термостатных устройств. Прежде всего было произведено десять измерений длины стального трубчатого интерференционного эталона при различных температурах. Во время каждого измерения температура оставалась постоянной, а при всех десяти измерениях колебания ее не выходили за пределы $20 \pm 3^\circ \text{C}$. Обработка результатов методом наименьших квадратов позволила получить длину эталона при 20°C и его температурный коэффициент удлинения. Средняя квадратичная погрешность результата измерения длины эталона составляла $0,006 \text{ мк}$.

Затем в течение 6 дней была произведена серия измерений длины геодезического кварцевого жезла, изготовленного ранее в оптической лаборатории. Для исследования прибора был выбран кварцевый жезл, так как его номинальная длина (1200 мк) равна пределу измерения на данном приборе

¹ См. стр. 47 настоящего сборника.

и поэтому погрешность измерения его длины может наиболее полно характеризовать интерферометр.

Перед каждым измерением термостат прибора был соединен с ультратермостатом ТС-15 в течение 6 часов, после чего внутри местного термостата устанавливалась постоянная температура. О равномерности температурного поля в интерферометре можно было судить по незначительным градиентам температур во время измерений между трубчатым эталоном и жезлом. Средняя квадратичная погрешность ряда этих измерений длины жезла не превышала $\pm 0,09$ мк. Это показывает, что прибор пригоден для выполнения на нем измерений.

С целью сличения результатов измерений, полученных на универсальном и горизонтальном интерферометрах, на них последовательно были произведены измерения длины двух плоскопараллельных концевых мер с номинальными размерами 500 и 1000 мм (малые габариты горизонтального интерферометра не позволяют производить на нем измерения геодезических жезлов).

Результаты измерений, полученные на двух приборах для меры с номинальной длиной 500 мм, отличаются друг от друга на величину 0,02 мк, а для меры 1000 мм — на 0,28 мк. Величины этих расхождений меньше погрешности определения средней длины, допускаемой ОСТ 85000—39 для мер 1-го разряда. Таким образом, исследование показало пригодность созданного интерферометра для абсолютных измерений длины мер и жезлов с высокой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф. и Карташев А. И., Труды ВНИИМ, вып. 7 (67), 1949, стр. 23.
2. Захарьевский А. Н., Интерферометры, Оборонгиз, 1952, стр. 147.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОФИЛОСКОП

В настоящее время перед металлообрабатывающей промышленностью нашей страны стоит задача повышения качества отечественных изделий. Прежде всего машиностроители — конструкторы и производственники должны стремиться к улучшению эксплуатационных свойств выпускаемых машин. Эксплуатационные свойства, связанные со сроком службы машин, зависят во многом от качества обработки поверхностей деталей. Усовершенствование технологии обработки требует быстрых и точных методов контроля качества поверхностей.

Вопрос о качестве обработки поверхности изучается очень давно. Еще в 1874 г. нашим соотечественником профессором артиллерийской академии Чебышевым в Русском техническом обществе был сделан доклад о влиянии фрезерования на чистоту обрабатываемой поверхности, и была предложена формула для определения высоты гребешков. Таким образом, Чебышев первый в мире сформулировал проблему зависимости качества поверхности от технологических режимов и инструмента и приступил к ее изучению. Несколько позднее, также в России, в 1898 г. при изготовлении на Тульском оружейном заводе трехлинейных винтовок конструкции капитана Мосина впервые была применена серия лекал с чистотными характеристиками.

После первой мировой войны начинают появляться отдельные работы, посвященные этому вопросу, и за рубежом. Большое количество исследований в области качества поверхности как в отечественной литературе, так и в иностранной, появилось за последние двадцать лет. В нашей стране создана школа ученых, исследования которых по глубине и широте изучения вопроса чистоты поверхности во многом превосходят зарубежные исследования в этой области. Разработано много различных методов, позволяющих оценивать качество поверхности, и созданы образцы, определяющие чистоту поверхности согласно ГОСТ 2789—51. Однако существующие методы и приборы для оценки микрогеометрии поверхности не вполне решают задачу быстрого и точного контроля ее в заводских условиях.

Широкое практическое применение нашли почти все контактные приборы как профильные, так и интегральные. Особенно широко применяются электродинамические и электромагнитные профилометры Киселева и Аббота [1] и оптико-механические профилографы Левина и Аммона [2, 3]. Из бесконтактных методов применяются: интерференционный метод и метод светового сечения (микронинтерферометр и двойной микроскоп академника В. П. Линника [2]).

С эксплуатационной точки зрения преимущество, безусловно, должно быть на стороне бесконтактных методов, потому что, несмотря на большое вертикальное увеличение профилограмм и хорошую повторяемость результатов при профилировании одной и той же трассы, при применении контактных методов на практике выявляется ряд существенных недостатков послед-

них. Как бы хорошо ни были рассчитаны и изготовлены иглы — щупы и направляющие упоры, при профилировании образцов (особенно из мягких материалов) неизбежно остаются царапины от хода иглы и направляющих упоров, т. е. в процессе профилирования портится обработанная поверхность. Вторым существенным недостатком контактных приборов является чрезвычайная чувствительность их к внешним вибрациям. Эти вибрации даже при специально предусмотренных амортизаторах и креплениях щупа передаются ему и искажают снимаемую профилограмму. Чувствительностью к вибрациям обладает и микроинтерферометр академика Линника. Малое поле зрения этого прибора затрудняет быструю оценку больших участков поверхности.

С помощью двойного микроскопа можно непосредственно получить представление о действительном характере микрогеометрии поверхности, но только до 9-го класса.

Кроме приведенных недостатков, относящихся только к контактным или бесконтактным методам, следует еще упомянуть об одном существенном недостатке, общем для тех и других. Ни один из существующих приборов не дает возможности одновременно производить качественную и количественную оценку микрогеометрии, т. е. наблюдать профиль поверхности и одновременно отсчитывать значения величин $H_{св}$, $H_{сз}$ или $H_{ср}$. Приборами интегрального типа можно измерить средние значения высоты неровности, но с их помощью нельзя получить представления о профиле отдельных участков поверхности. Профильные приборы как контактные, так и бесконтактные, непосредственно воспроизводят профиль поверхности, т. е. дают качественную оценку. Для количественной оценки требуется затрата времени либо на визуальные промеры картины профиля непосредственно под микроскопом с последующей длительной обработкой результатов измерения, либо на фиксацию этой картины и на весьма трудоемкую обработку профилограмм.

На основании вышеизложенного можно сказать, что в настоящее время не существует ни одного прибора, полностью отвечающего требованиям, выдвинутым промышленностью.

В настоящей статье предложен новый бесконтактный фотоэлектрический метод оценки микрогеометрии поверхности и дано описание принципа действия прибора, представляющего собой совокупность профилоскопа и профилометра.

Принцип действия прибора

Фотоэлектрический профилоскоп основан на принципе рефлектометрии. Известно, что природа отражения света и степень его рассеяния связаны с характером микрорельефа поверхности. Это позволило разработать ряд методов, основанных на измерении коэффициентов отражения света от металлических поверхностей в различных направлениях. Однако разработанные методы являются большей частью интегральными и не дают представления о характерных особенностях поверхностей. Единственный профильный метод, предложенный в диссертации Е. П. Осмоловской и основанный на изучении местных изменений коэффициента отражения на малых участках поверхности, ввиду чрезвычайной трудоемкости не нашел широкого применения.

Типичные неровности, образующиеся на поверхности при различных видах механической обработки (точение, строгание, шлифование, фрезерование и доводка), оказываются тупыми, т. е. их высота значительно меньше ширины. Углы впадины колеблются в пределах от 150° до 180° .

Для пояснения принципа действия предлагаемого нами фотоэлектрического профилоскопа обратимся к рис. 1. Представим себе схематический профиль поверхности в виде ломаной линии с углом впадины, равным 150° . Тогда угол отдельных элементов этого схематического профиля с нормалью к его средней линии составит 75° .

Пусть пучок света, шириною S , падает на схематическую поверхность под углом 40° к средней линии профиля. Часть пучка S_1 встречает на своем пути элемент I схематической поверхности. Как видно из рисунка, угол падения этой части светового пучка на элемент I равен 25° . Отразившись по закону отражения, пучок света составит угол в 10° с нормалью к средней линии профиля. Вторая часть светового пучка S_2 встретит на своем пути элемент II поверхности и, правильно отразившись от него, составит с нормалью к средней линии профиля другой угол, т. е. отраженный пучок от элемента II пойдет по другому направлению.

Если выбрать некоторое определенное направление отраженных лучей (указанное на рисунке стрелкой), то по нему пойдут только те пучки или их части, которые будут отражаться от одинаково расположенных элементов поверхности. Заставим падающий пучок света S периодически перемещаться по некоторому участку поверхности, тогда световой поток, отраженный в данном направлении,

будет переменным. Характер изменения отраженного светового потока будет связан с характером самого профиля поверхности. Допустим, что для схематического профиля в первом приближении можно считать, что отношение высоты неровности к шагу профиля остается все время постоянным. Тогда при неизменном падающем световом потоке амплитуда изменения отраженного в данном направлении светового потока будет зависеть от высоты неровностей H . Таким образом, изменение величины H при прочих равных условиях повлечет за собой изменение амплитуды отраженного в данном направлении светового потока.

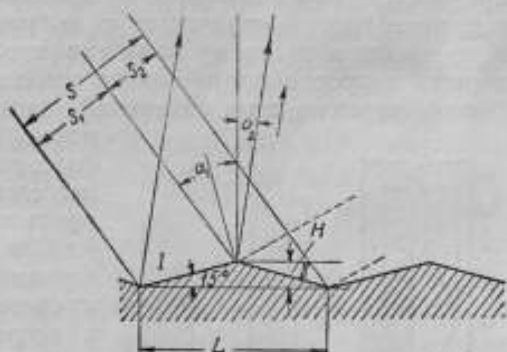


Рис. 1.

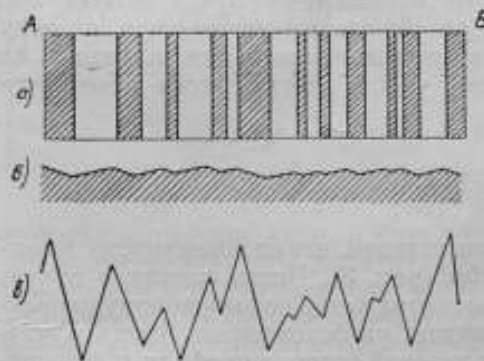


Рис. 2.

Этим явлением можно воспользоваться для оценки микрогеометрии поверхности. Если отраженный световой поток направить на фотоземлет, то изменения светового потока вызовут пропорциональные изменения фототока в цепи фотоземлета. Усиливая с помощью лампового усилителя переменную составляющую фототока, нетрудно заметить зависимость выходного напряжения усилителя от величины неровности исследуемой поверхности. Следует подчеркнуть, что ширина светового пучка S должна каждый раз выбираться соответственно определенным значениям шагов λ исследуемой поверхности.

На рис. 2 представлен график изменения отраженного светового потока при перемещении светового пучка по исследуемой поверхности от некоторой точки A до некоторой точки B. Рис. 2, a соответствует теневой картине изменения отраженного светового потока, рис. 2, б — участку профиля исследуемой поверхности. Выходное напряжение также будет изменяться пропорционально изменениям отраженного светового потока.

Закон изменения выходного напряжения усилителя можно изучать с помощью электронного осциллографа. Если периодическое движение

светового пучка по исследуемой поверхности синхронизировать с разверткой электронного луча осциллографа, то на экране его трубки можно получить картину, подобную графику, изображенному на рис. 2. Этот график с достаточно большим вертикальным увеличением почти повторяет профиль исследуемого участка поверхности (рис. 2, б).

Для выяснения характера искажения профиля и зависимости изменения выходного напряжения усилителя от изменения высоты неровности H , был произведен приближенный графо-аналитический расчет. Профиль реальных поверхностей отличается от выбранного нами схематического упрощенного профиля и потому даже графическим методом невозможно до конца решить вопрос о форме закона изменения отраженного светового потока. Однако характер этих изменений каждый раз связан с характером профиля

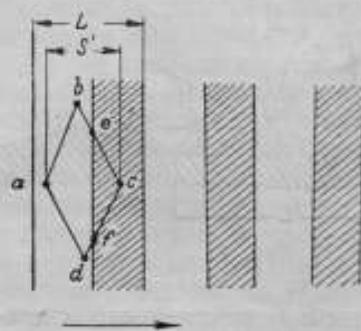


Рис. 3.

исследуемой поверхности. Это допущение было подтверждено при экспериментальном исследовании макета фотоэлектрического профилоскопа.

Для выяснения зависимости изменения отраженного светового потока от характера микрогеометрии исследуемой поверхности с теоретической точки зрения, воспользуемся графической моделью схематического профиля (рис. 1), т. е. будем опять рассматривать этот профиль как чередование возвышенностей и впадин в форме треугольников с углами при вершинах, равными 150° . Как уже упоминалось, если световой пучок падает на поверхность под углом 40° с нормалью к средней линии профиля, то отраженный пучок пойдет под углом 10° и попадет на фотоэлемент. При попадании на теневую сторону световой пучок отражается в другом направлении и не попадает на фотоэлемент. Обозначим шаг неровности через L , тогда высота неровности будет:

$$H = \frac{L}{2} \operatorname{tg} \alpha,$$

где $\alpha = 15^\circ$ или $H = 0,134 L$.

Допустим, что сечение светового пучка таково, что на поверхность проектируется пятно ромбической формы $abcd$ (рис. 3). Часть светового пучка, ограниченная фигурой $abefd$, претерпевает отражение по выбранному направлению под углом 10° к нормали и попадает на фотоэлемент. Часть пучка, ограниченная фигурой ecf , остается на теневой стороне профиля и не попадает на фотоэлемент. Очевидно, отраженный световой поток, падающий на фотоэлемент, будет пропорционален отношению площадей $abefd$ и $abcd$, так что

$$Q = \frac{n\lambda \cdot abefd}{n\lambda \cdot abcd}.$$

Если освещающее пятно перемещать по поверхности в направлении стрелки на величину x , то величина Q будет периодически меняться.

В табл. 1 приведены вычисленные значения отношения площадей Q для различных отношений проекции ширины светового пучка S' к шагу L (при изменении x от 0,1 до 2 величины шага L). Как видно из таблицы, изменения отраженного светового потока находятся в зависимости от отношения $\frac{S'}{L}$.

На рис. 4 приведены кривые, построенные по данным таблицы для некоторых значений $\frac{S'}{L}$. Кривые показывают, что с изменением величины L при неизменном значении S' характер изменения отраженного светового

Таблица 1

$\frac{S'}{L}$ \ X	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,1	1	1	1	1	1	1	0,034	0	0	0	1
0,2	1	1	1	1	1	0,620	0,120	0	0	0,50	1
0,3	1	1	1	1	0,816	0,142	0,001	0	0,090	0,910	1
0,4	1	1	1	0,953	0,780	0,080	0,001	0,063	0,500	0,937	1
0,5	1	1	0,970	0,860	0,180	0,051	0,041	0,160	0,840	0,960	1
0,6	1	0,979	0,903	0,460	0,252	0,129	0,223	0,500	0,778	0,944	1
0,7	0,969	0,890	0,742	0,306	0,148	0,216	0,367	0,634	0,836	0,959	0,969
0,8	0,890	0,744	0,532	0,339	0,267	0,323	0,500	0,717	0,875	0,945	0,890
0,9	0,796	0,629	0,448	0,342	0,335	0,426	0,602	0,776	0,881	0,888	0,796
1,0	0,700	0,547	0,420	0,377	0,411	0,525	0,780	0,804	0,850	0,815	0,700
1,1	0,625	0,501	0,431	0,426	0,488	0,608	0,723	0,785	0,785	0,718	0,625
1,2	0,580	0,490	0,458	0,484	0,563	0,660	0,731	0,759	0,738	0,670	0,580
1,3	0,551	0,502	0,498	0,561	0,620	0,679	0,726	0,716	0,685	0,618	0,551
1,4	0,548	0,524	0,541	0,592	0,643	0,674	0,685	0,676	0,649	0,602	0,548
1,5	0,557	0,554	0,580	0,620	0,647	0,656	0,655	0,649	0,625	0,585	0,557
1,6	0,576	0,582	0,630	0,636	0,638	0,638	0,638	0,631	0,612	0,583	0,576
1,7	0,595	0,601	0,618	0,625	0,624	0,625	0,625	0,631	0,602	0,595	0,595
1,8	0,605	0,612	0,617	0,618	0,618	0,615	0,616	0,617	0,614	0,608	0,605
1,9	0,610	0,611	0,613	0,614	0,613	0,612	0,613	0,614	0,611	0,609	0,610
2,0	0,614	0,614	0,614	0,614	0,614	0,613	0,613	0,614	0,613	0,614	0,614

X — смещение светового пятна в долях L

потока, а следовательно, и фототока, поступающего в усилитель, в значительной мере меняется. Амплитуда изменения светового потока ($Q_{\max} - Q_{\min}$) уменьшается с уменьшением величины L . Схема усилителя такова, что он реагирует только на переменную составляющую фототока, пропорциональную изменениям отраженного светового потока, и характер изменения выходного напряжения усилителя в зависимости от шага L подобен кривым на рис. 4.

Пользуясь экспериментальными данными Дьяченко [6], можно для некоторого реального профиля составить таблицу значений L и соответствующих им значений $H_{\text{ср}}$, а затем построить график изменения светового потока с изменением $H_{\text{ср}}$ (рис. 5).

В табл. 2 сведены средние значения высот микронеровностей, соответствующие им значения шага L , взятые из работы Дьяченко [6], а также отношения $\frac{S'}{L}$ и значения $Q_{\max} - Q_{\min}$ из табл. 1. Для расчета отношения $\frac{S'}{L}$

Таблица 2

$H_{\text{ср}}$	L	$\frac{S'}{L}$	$\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_0}$
0,5	32	1,5	0,1
1,5	48	1	0,47
3	96	0,5	0,96
6	128	0,37	0,99
12	192	0,25	1

было выбрано некоторое значение сечения проекции светового пучка $S' = 48 \text{ мк}$.

Из табл. 2 и графика (рис. 5) видно, что выбранное сечение проекции светового пучка $S' = 48 \text{ мк}$ позволяет производить оценку микрогеометрии поверхностей от 4-го до 9-го классов согласно ГОСТ 2789-51. Такое сечение,

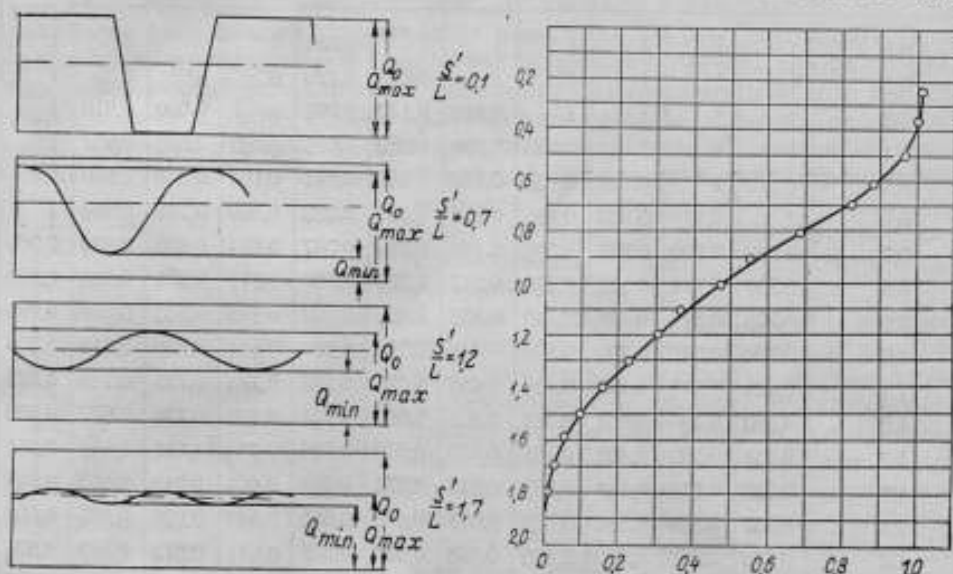


Рис. 4.

Рис. 5.

как мы увидим ниже, не является минимально возможным. Уменьшая сечение проекции светового пучка до 20—10 мк, можно распространить оценку и на более высокие классы (от 10-го до 14-го).

Для экспериментальной проверки вышеприведенных теоретических рассуждений был собран действующий макет прибора и произведено его исследование на образцах поверхностей различных классов и материалов.

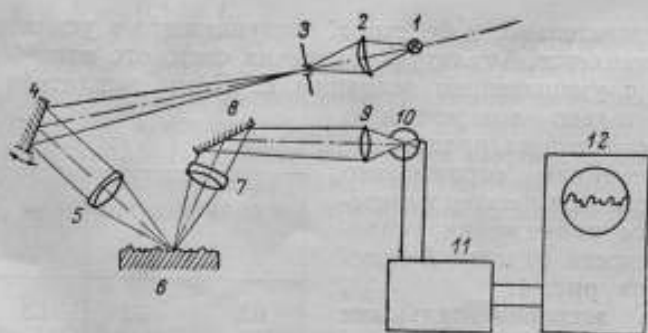


Рис. 6.

На рис. 6 представлена общая схема макета прибора. Пучок света, выходящий из узкой и короткой щели 3, проектируется объективом 5 на исследуемую поверхность так, что на последней получается уменьшенное изображение щели в виде маленькой светящейся точки. На пути лучей, падающих в объектив 5, находится зеркало вибратора 4 (подобного вибраторам, применяемым в шлейфовых осциллографах). Зеркало периодически отклоняет луч на некоторый угол и тем самым заставляет светящуюся точку совершать возвратно-поступательное движение по исследуемой поверхности.

Так как вибратор питается от сети переменного тока, то светящаяся точка обегает исследуемый участок 50 раз в секунду.

Отраженный пучок лучей собирается объективом 7 и посредством зеркала 8 и конденсора 9 направляется на фотозлемент 10. Таким образом, когда зеркальце вибратора приведено в колебательное движение, фотозле-

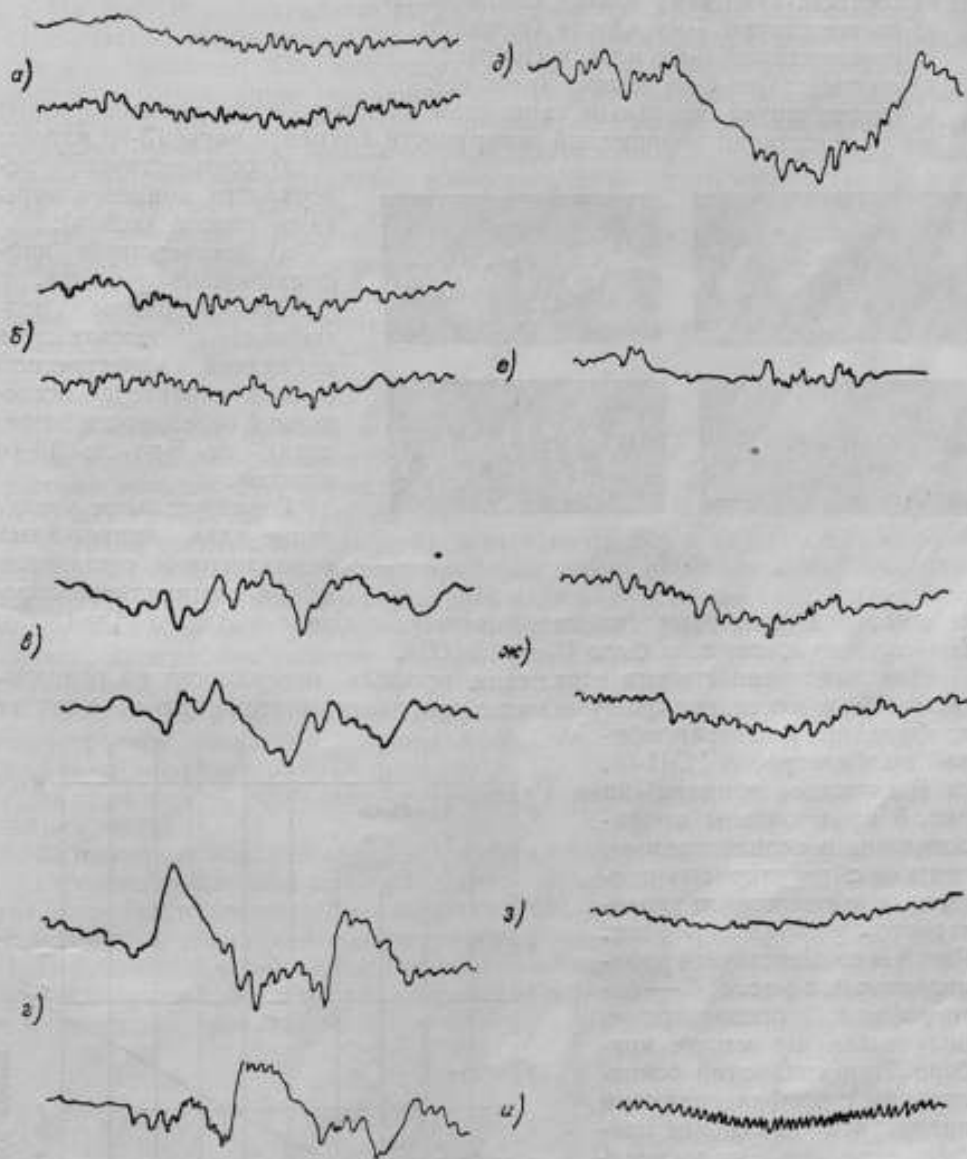


Рис. 7.

мент будет освещаться периодически прерывистым светом, соответствующим характеру микрогеометрии поверхности. Фотозлемент включен в схему усилителя 11, на выходе которого установлен гальванометр или электронный осциллограф 12. На экране последнего можно видеть развернутую картину последовательного изменения светового потока, падающего на фотозлемент. По оси X развертка происходит с частотой 50 гц, т. е. с той же частотой, с которой луч обегает поверхность, по оси Y отклонения луча соответствуют

усиленному фототоку. Кривые на экране осциллографа можно отождествить с профилограммой исследуемой поверхности.

На рис. 7 приведены осциллограммы, полученные при исследовании различных образцов, причем:

- а) соответствуют 9-му классу (шлифование);
- б) соответствуют 8-му классу (шлифование);
- в) соответствуют 7-му классу (точение);
- г) соответствуют 6-му классу (точение);
- д) соответствует 5-му классу (точение);
- е) соответствует отдельным царапинам на поверхности концевой меры;
- ж) соответствуют изношенной поверхности концевой меры 13-го класса;

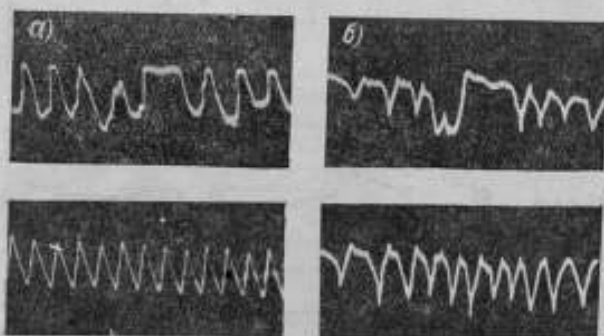


Рис. 8.

з) соответствует поверхности концевой меры 14-го класса (новая);

и) соответствует дифракционной решетке.

Осциллограммы подтверждают возможность наглядной качественной оценки характера исследуемой поверхности в пределах от 5-го до 14-го классов.

Горизонтальное увеличение для приведенных осциллограмм составляло 40×, а вертикальное, опре-

деляемое коэффициентом усиления, в случаях а, б, в, г и д было $V_1 = 1500\times$, для случаев е, ж, з, и было $V_2 = 15\ 000\times$.

Для выяснения степени искажения профиля поверхности на осциллограмме было проведено сравнение их с профилограммами, снятыми с тех же профилей или участков профилей профилографом ИЗП-17.

В качестве примера на рис. 8 представлены профилограммы и осциллограммы, снятые с регулярного профиля и с некоторого характерного участка профиля. Рис. 8, а соответствует профилограммам, а рис. 8, б — фотографиям осциллограмм, полученным на макете прибора. При сравнении осциллограмм с профилограммами видно, что искажение профиля невелико. Это экспериментально подтверждает возможность использования фотоэлектрического профилоскопа для объективной качественной оценки микрогеометрии поверхности.

Дальнейшие исследования макета показали, что предлагаемый прибор может быть использован не только как профилоскоп, но и как профилометр. Выпрямленное напряжение на выходе усилителя можно регистрировать с помощью зеркального гальванометра. Шкала гальванометра может быть

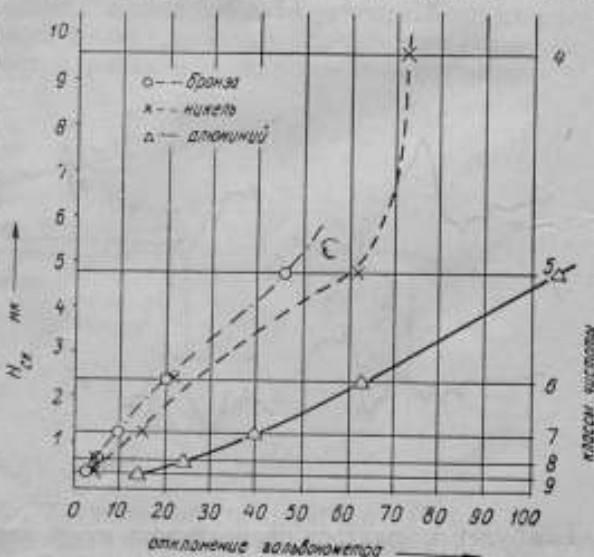


Рис. 9.

проградуирована по образцам чистоты поверхности, аттестованным согласно ГОСТ 2789—51. Изменение выходного напряжения усилителя, как уже упоминалось, пропорционально изменению отраженного светового потока, а следовательно, должно быть связано с критериями оценки микрогеометрии поверхности зависимостью, по своему характеру подобной расчетной кривой (рис. 5).

На рис. 9 представлены экспериментальные кривые зависимости $H_{ск}$ от показаний гальванометра для образцов, относящихся к различным классам и материалам. По оси ординат отложены значения $H_{ск}$, а по оси абсцисс — отклонения гальванометра. Точки, соответствующие образцам из одного и того же материала, ложатся на кривые, по характеру почти подобные расчетной кривой (рис. 5). Следует отметить, что величина отклонения гальванометра зависит от материала, из которого изготовлен образец. Так, для одного и того же класса чистоты поверхности это отклонение тем больше, чем выше коэффициент отражения металла. Поэтому при градуировке шкалы прибора, осуществляемой по образцам, аттестованным согласно ГОСТ 2789—51, следует составить поправочную таблицу на различные значения коэффициента отражения для различных металлов.

Заключение

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть преимущества предлагаемого прибора, дающего возможность объективно исследовать бесконтактным методом микрогеометрию поверхностей различных классов чистоты от самых грубых до самых высших.

Затраты времени на установку детали на прибор и отсчет по прибору — ничтожно малы. Пользоваться прибором может работник любой квалификации. Профилограмма, получающаяся на экране осциллографа, может быть легко зафиксирована при помощи примитивного рисовального приспособления. Время, необходимое на фиксацию профилограммы, исчисляется секундами.

Измеряя величину выпрямленного тока на выходе усилителя, можно градуировать показания прибора в $H_{ср}$, $H_{ск}$ или $H_{св}$.

Таким образом, прибор позволяет:

а) производить исследование качества поверхностей без какого-либо их повреждения;

б) непосредственно исследовать поверхности в труднодоступных местах.

Оптическая система прибора может быть конструктивно осуществлена так, что будет допускать исследование как наружных, так и внутренних поверхностей различной конфигурации.

Перечисленные преимущества дают основания предполагать, что прибор может получить широкое распространение при лабораторных исследованиях и в заводской практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев В. М., «Вестник машиностроения», 1949, № 6.
2. Левин Б. М., Контактный метод измерения микрогеометрии поверхности, Машгиз, 1950.
3. Аммон К. А., Сборник сокращенных докладов Конференции по резанию металлов, 1937.
4. Ливинк В. П., ДАН СССР, 1, 1933.
5. Ливинк В. П., ДАН СССР, 1945.
6. Дьяченко П. Е., Вайнштейн В. Э., Розенблюм Б. С., ИАН СССР, 1952.

ОПЫТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЭТАЛОНОВ ТИПА ФАБРИ И ПЕРО

Для изучения строения спектральных линий потребовалось создание приборов высокой разрешающей силы. Таковыми явились эшелоны Майкельсона, плоскопараллельные пластинки Луммера и Герке и интерферометры Фабри и Перо. Последние нашли самое широкое применение во всех современных исследованиях как в области спектроскопии (исследования строения контуров спектральных линий), так и в области спектрометрии (точные измерения длин волн спектральных линий) и в метрологии (измерения длины методами интерференции).

Теория интерферометра Фабри и Перо достаточно хорошо изучена. В ряде монографий [1, 2, 3, 4] и журнальных статей [5, 6] подробно изложены вопросы, связанные с разрешающей силой прибора, распределением интенсивности в интерференционной картине, с приборной шириной спектральной линии и т. п. В настоящей статье рассмотрены различные конструкции интерферометров Фабри и Перо и изложен наш опыт по изготовлению эталонов типа Фабри и Перо.

1. Конструкция интерферометров Фабри и Перо

Интерферометр для наблюдения явления интерференции равного наклона был предложен Фабри и Перо в 1897 г. Принцип его устройства, как известно, чрезвычайно прост. Две стеклянные или кварцевые плоские пластинки, покрытые слоями серебра — зеркала интерферометра, — устанавливаются на некотором расстоянии строго параллельно друг другу. В интерферометре, внешний вид которого представлен на рис. 1, можно постепенно изменять расстояние между зеркалами от 0 до 100—150 м.м. Это изменение расстояния осуществляется чрезвычайно медленными и плавными перемещениями зеркал по направляющим. Прибор снабжен всеми необходимыми деталями для регулировки параллельности зеркал во время их передвижения. Изготовление оптики такого прибора не вызывает затруднений, тогда как при изготовлении механических частей требуется высокая точность (особенно направляющих и деталей, обеспечивающих параллельность зеркал при движении).

Значительно более простым по изготовлению и удобным в работе является интерферометр с фиксированным расстоянием между зеркалами, названный его авторами — Фабри и Перо — эталоном. Это название ни в какой мере не связано с понятием «эталон» в метрологическом смысле, оно лишь означает неизменность расстояния между зеркалами.

Набором эталонов с различными расстояниями между зеркалами вполне можно заменить интерферометр почти во всех исследованиях, основанных на наблюдении интерференционных колец равного наклона. Интерферометр

остаётся незаменимым только при установлении видимости интерференционной картины на всем протяжении от нуля до предела когерентности данной спектральной линии.

В настоящее время интерферометры являются уникальными приборами, тогда как эталоны Фабри и Перо вошли в число приборов, составляющих обязательное оборудование любой современной физической лаборатории.

На рис. 2 представлен внешний вид, а на рис. 3 — схематический чертеж обычной конструкции эталона Фабри и Перо в разрезе. В массивную оправу 1 (рис. 3) вставлено кольцо 2, к трем выступам 5 которого прижаты посредством пружин 7 зеркала 3 с нанесенными на них светодетельными слоями 4. С помощью винтов 6 и пружин 7 можно производить регулировку параллельности зеркал эталона. В конструкции оправы предусмотрена возможность установки колец различной толщины (чаще всего в пределах 5—40 мм).

На обеих торцевых поверхностях колец симметрично расположено по три выступа, так что линия, соединяющая центры двух соответствующих выступов, строго параллельна оси кольца. Эти выступы имеют или форму

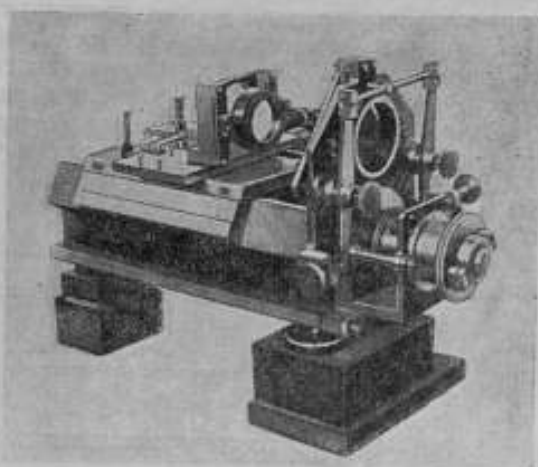


Рис. 1.

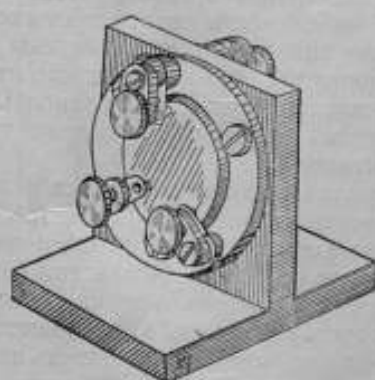


Рис. 2.

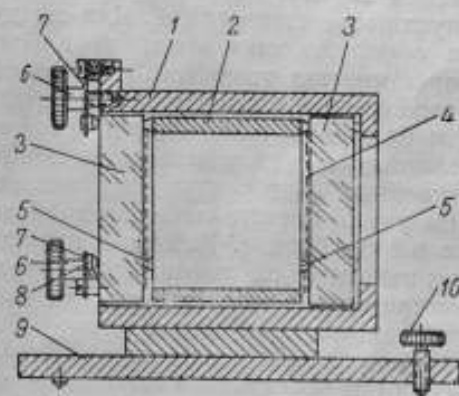


Рис. 3.

прямоугольников, размером 1×1 — $1,5 \times 1,5$ мм, или сферическую форму. Поверхности выступов отполированы с высокой точностью. Расстояние между соответствующими выступами вдоль образующих кольца, т. е. параллельность плоскостей, определяемых ими, выдерживается с погрешностью, не превышающей долей микрона. Дальнейшая подгонка параллельности положения зеркал достигается при юстировке прибора путем воздействия упругих сил пружин на зеркала и кольцо. Пружины с винтами располагаются против каждого выступа кольца. В современных оправках регулирующие пружины расположены только с одной стороны, на внутренней же стороне другой имеются три выступа, по которым ориентируется кольцо.

При исследовании строения спектральных линий с помощью эталонов Фабри и Перо обычно пользуются фотографической регистрацией интерференционной картины. Во избежание заметного влияния изменения температуры эталона на интерференционную картину в течение экспозиции кольца изготовляют из материалов с малыми коэффициентами термического удлинения. Для эталонов, толщина колец которых не превышает 100 мк, регулировку параллельности зеркал удобно производить посредством пружин и винтов. Для эталонов длиной свыше 100 мк больше подходит другая конструкция регулировки [7]. На рис. 4 представлен схематический чертеж второй конструкции регулируемого эталона в разрезе.

Эталон представляет собой полый металлический цилиндр 1 с толщиной стенок 10—15 мк, снабженный с обоих концов обоймами 5, соединенными

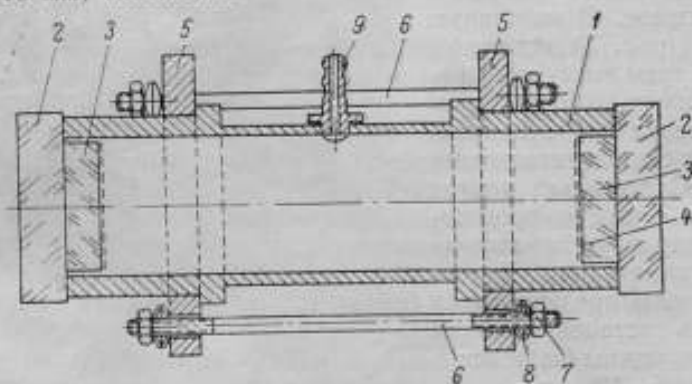


Рис. 4.

тяжами 6 на гайках 7. Внутренний диаметр трубы эталона определяется размером зеркал. Регулировка параллельности основана на гнущейся трубе посредством тяжей. Для соединения внутреннего пространства эталона с окружающим воздухом в боковой поверхности цилиндрического корпуса имеется отверстие. Оба торца трубы такого эталона доведены до высокой степени плоскостности и параллельности так, что к ним можно притереть на оптический контакт зеркала в виде пластины или в виде блоков [3], состоящих из двух плоских стеклянных пластин 2 и 4 разного диаметра, соединенных друг с другом оптическим контактом.

На рис. 5 представлены внешний вид корпуса подобного эталона и зеркала в виде блоков. Рабочими являются пластины меньшего диаметра, на них и наносятся светоделительные отражательные слои. Пластины меньшего диаметра входят в полость корпуса, а свободная поверхность пластин большего диаметра притирается к трубе. Такой способ крепления зеркал обеспечивает постоянство длины эталона и герметичность внутреннего пространства. Большим преимуществом подобной конструкции является возможность изменения давления внутри эталона без помещения его в дополнительную камеру посредством насоса, который может быть соединен с патрубком 9 (рис. 4). Изменение давления внутри эталона ведет к изменению оптической разности хода интерферирующих лучей. Постепенной откачкой воздуха или добавлением его во внутреннее пространство трубы можно менять разность хода в очень небольших пределах, что особенно важно при подгонке длины эталона для наблюдения полос переналоженния [8 и 9].

Регулируемые эталоны имеют основной недостаток: параллельность их не сохраняется в продолжение всего эксперимента, что вызывает в некоторых случаях довольно частую добавочную юстировку прибора, а поправка параллельности нарушает стабильность длины эталона. Поэтому для точных измерений длины или длин волн желательно, чтобы конструкция эталона не имела регулировки параллельности.

Наиболее простой формой нерегулируемого эталона являются стеклянные или кварцевые плоскопараллельные пластинки, с двух сторон покрытые светоделительными слоями. Плоскопараллельные пластинки из целого куска стекла или кварца большой толщины (40 мм и выше), а также малой толщины (5 мм и ниже) трудно изготовить. Наличие больших потерь света в стекле или кварце резко снижает интенсивность интерференционной картины. Кристаллический кварц или стекло имеют сравнительно большой коэффициент расширения, а изготовление из плавленого кварца — нежелательно, так как коэффициент преломления его зависит от температуры.

Все вышперечисленное дает основание для отказа от пластинок из целого куска стекла или кварца и замены их нерегулируемой формой эталонов с воздушной прослойкой между зеркалами. При малых разностях хода (до 10 мм) кольцо

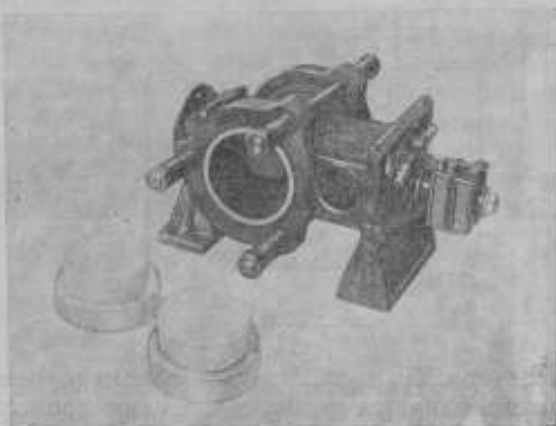


Рис. 5.

регулируемого эталона может быть заменено тремя плоскопараллельными пластинками диаметром 5—6 мм и толщиной 4—5 мм. К этим пластинкам на оптический контакт притирают зеркала эталона, причем в месте притирания светоделительные слои снимают. Параллельность торцевых сторон и равенство толщины этих пластинок выдерживают с погрешностью, не превышающей 0,1 интерференционной полосы. На рис. 6 представлен схематический чертеж такого эталона.

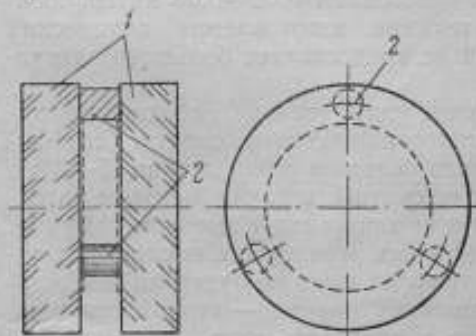


Рис. 6.

Для больших разностей хода конструкция нерегулируемых эталонов на «трех точках» является менее удобной. Чем больше толщина промежуточных пластинок, тем труднее при диаметре 5—6 мм выдержать с требуемой точностью параллельность торцевых сторон, и тем менее стабильна система. Прогиб цилинд

ров будет искажать параллельность установки зеркал эталона; значительное же увеличение их диаметров поведет к сокращению рабочей поверхности зеркал.

Три столбика 2 (рис. 6) в виде плоскопараллельных цилиндров можно заменить одним массивным параллелепипедом, к основаниям которого притираются на оптический контакт зеркала (рис. 7) [10].

На свободную поверхность зеркал 2 наносят светоделительные слои. В этом случае параллельность и размер эталона, особенно при больших разностях хода, зависят не только от параллельности оснований параллелепипеда 1, но и от того, как эталон установлен в горизонтальном положении.

Опыт оптической лаборатории ВНИИМ по созданию и использованию интерференционных эталонов типа Фабри и Перо показал, что наиболее подходящей конструкцией нерегулируемых эталонов для спектрометрических

целей являются трубчатые эталоны. На рис. 8. представлен схематический чертеж трубчатого эталона.

К торцевым поверхностям трубы 1 на оптическом контакте притираются зеркала 2. Светоделительный слой в месте контакта полностью снят. Патрубок 3 служит для соединения внутреннего пространства трубы с окружающим

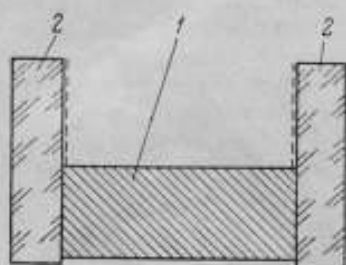


Рис. 7.

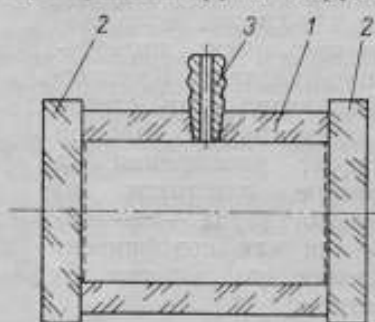


Рис. 8.

воздухом. Подгонка параллельности торцевых сторон трубы такого эталона, хотя и является весьма трудоемким процессом, но достигнутая в результате стабильность системы полностью окупает затраченный труд.

2. Технология изготовления эталонов

Зеркала для интерференционных эталонов представляют собой плоские пластины слегка клиновидной формы; угол между верхней и нижней поверхностями пластин достигает нескольких минут. Отклонения от плоскостности рабочих поверхностей зеркал обычно не превышают 0,02—0,05 интерференционной полосы. При современной технике изготовления оптических поверхностей достижение такой точности не представляет большого затруднения.

Для обеспечения высокой разрешающей силы эталона рабочие поверхности зеркал должны быть покрыты высокоотражающими слоями (коэффициент отражения 92—94%) при достаточно большом пропускании (5—7%), что достигается методами многослойных покрытий, а также методом катодного распыления или испарения серебра или алюминия в высоком вакууме. Технология изготовления зеркал и покрытия их отражающими слоями изложена в вышеупомянутых статьях и монографиях и мы не будем на ней останавливаться, а изложим процесс изготовления кольца — второй основной части эталона, — обеспечивающей размер и параллельность установки его зеркал.

В качестве материала для изготовления кольца обычно используют инвар или плавленый кварц. Ранее кольца делались только из инвара, в настоящее время, когда освоено массовое производство труб из плавленого кварца, самыми подходящими заготовками для колец являются эти трубы. Наиболее рациональный размер внутреннего диаметра колец 40—60 мм. При таком световом диаметре зеркал светосила эталона (при наблюдении интерференционной картины в параллельном световом пучке) достаточно высока. Диаметр световых пучков обычных спектральных приборов, с которыми скрещивается эталон, в редких случаях превосходит 60 мм, поэтому изготовление колец большего диаметра требуется лишь в особых случаях. Трубы с толщиной стенок 2—5 мм вполне подходят для изготовления колец. Подобные трубы самых различных диаметров с толщиной стенок 2—8 мм как из прозрачного, так и непрозрачного кварца выпускаются нашей промышленностью, и всегда можно подобрать трубу с нужным внутренним диаметром. Использование в качестве заготовок колец готовых труб

освобождает от весьма трудоемкого процесса высверливания полостей в сплошных цилиндрах.

Внутреннюю поверхность труб из плавленного кварца обычно изготавливают блестящей, оплавленной. Для того чтобы уничтожить мешающие при работе с эталоном отражения от внутренней поверхности кольца, ее следует отшлифовать, сделав матовой. Затем приступают к шлифовке первой торцевой поверхности трубы. После шлифовки этой поверхности мелким наждаком (№ 240), вторую также шлифуют, и кольцо подгоняют до требуемого размера с точностью до 1 мк. Параллельность и размер проверяют на оптиметре по плоскопараллельным концевым мерам 3-го разряда.

На каждую из подготовленных таким образом торцевых поверхностей в трех точках (приблизительно под углом 120°) друг против друга наклеивают латунные круглые пластинки диаметром 2,5—3 мм. Остальную часть поверх-

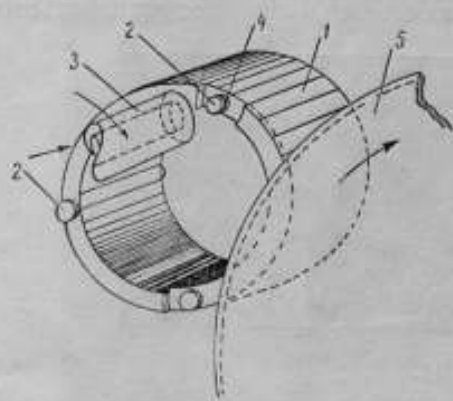


Рис. 9.

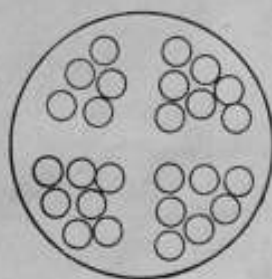
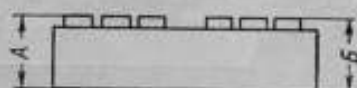


Рис. 10.

ности вышлифовывают. На рис. 9 представлена схема всего процесса обработки одной торцевой поверхности кольца. С помощью латунной трубки 3 (внутренний диаметр 2,6—3,1 мм и наружный — 8—10 мм) кварц выбирают на глубину 0,2—0,3 мм около латунных круглых пластинок 2, закрывающих будущие выступы кольца 4. Около выступов образуются углубления, между которыми кварц вышлифовывают на такую же глубину посредством латунного диска 5.

После снятия латунных предохранительных пластинок 2 на торцевых поверхностях отстают цилиндрические выступы 4, расположенные строго друг против друга. Окончательная подгонка параллельности до одной интерференционной полосы осуществляется полировкой выступов на пирексовой плите пастой ГОИ. Контроль параллельности производят методом наблюдения колец равного наклона в отраженном свете, образующихся при наложении двух плоских контрольных стекол на выступы кольца.

Плоскопараллельные цилиндрические столбики (точнее пластинки, так как толщина их не превышает 5—6 мм) для нерегулируемого эталона можно изготовить из стекла или плавленного кварца.

Получение трех совершенно одинаковых плоскопараллельных пластинок оказалось возможным в результате выбора их из большего числа пластинок, изготовленных в блоке. Из заготовок (диаметром 5—6 мм и требуемой толщины) составляют блок на пластинке диаметром 60 мм. Шлифовкой, а затем полировкой обычными методами доводят плоскостность блока с отступлением не более 0,1 интерференционной полосы. Затем блок расклеивают и заготовки полированной стороной притирают на оптический контакт к плоскопараллельной контактной пластине диаметром 60—80 мм, причем их располагают так, как это указано на рис. 10. Такое расположение удобно при

контроле плоскостности и параллельности пластинок наложением контрольного плоского стекла. Подгонка пластинок по размеру и параллельности осуществляется шлифовкой и полировкой блока с контактной пластиной. Предварительный контроль блока производят на оптиметре по размерам А и Б. Окончательный контроль по достижении необходимой плоскостности производят наложением контрольного плоского стекла.

Выбор идентичных по толщине пластинок можно осуществить, наблюдая полосы равной толщины при испытании всего блока на приборе для контроля плоских стекол. Выбранные пластинки снимают с оптического контакта на блоке и размещают на оптический контакт с зеркалами, как это показано на рис. 6. Оставшиеся на блоке пластинки могут быть использованы для подгонки других комплектов.

Как уже упоминалось, для осуществления стабильности длины и параллельности при разностях хода в эталонах свыше 20 мкм более рациональными

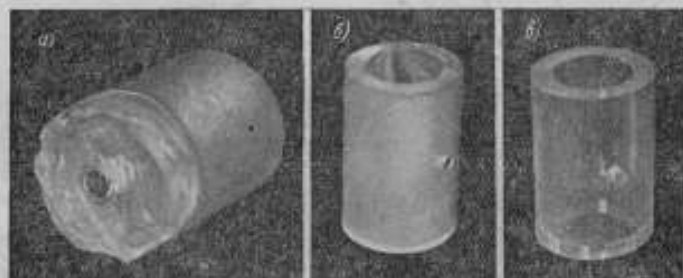


Рис. 11.

являются трубчатые эталоны. Процессы изготовления регулируемых и нерегулируемых трубчатых эталонов почти подобны. В качестве материала для изготовления трубчатых эталонов может быть использован оптический плавеный кварц, так как отсутствие пор и натяжений в нем позволяет обеспечить надежный оптический контакт между торцами трубы и зеркалами эталона. Готовых труб из оптического плавенного кварца с внутренним диаметром 50—60 мм и толщиной стенок 10—12 мм не производят, поэтому приходится изготавливать трубы эталонов из сплошного цилиндра (рис. 11, а).

В боковой поверхности такого цилиндра латунным сверлом диаметром 4,5—5 мм высверливают, прежде всего, отверстие на глубину $\frac{1}{2}$ внутреннего диаметра эталона. Затем на сверлильном станке также латунным сверлом диаметром на 0,5 мм меньшим требуемого внутреннего диаметра эталона высверливают сквозное отверстие. Внутренняя поверхность отверстия, образовавшегося после сверления, шлифуется. Затем наружную поверхность обрабатывают на обдирочном станке, так чтобы толщина стенок трубы достигла 10—12 мм, и приступают к шлифовке торцевых поверхностей трубы. Сначала шлифуют первую сторону под полировку, затем вторую с допуском на требуемую длину плюс 0,05 мм. Во время процесса шлифования периодически осуществляют контроль параллельности и длины трубы на оптиметре по плоскопараллельным концевым мерам 3-го разряда. При контроле большое значение имеет разность температур трубы эталона и меры, поэтому необходимо в результате сравнений вводить соответствующую температурную поправку. После шлифовки торцевых поверхностей заготовка (рис. 11, б) готова для окончательной доводки. При этом полируют первый торец с отступлением от плоскостности не более 0,1 интерференционной полосы, а при полировке второго — одновременно подгоняют длину трубы, параллельность и плоскостность с допусками: на длину $+1 \pm 1,5$ мкм, на параллельность и плоскостность $-0,1$ интерференционной полосы. Полировка торцевых

поверхностей производится обычным методом доводки оптических поверхностей.

Во время полировки необходим частый периодический контроль параллельности и длины трубы на оптиметре по мерам 2-го разряда при длительной выдержке меры и эталона на приборе, затем на интерференционном компараторе и, когда плоскостность и параллельность трубы близки к требуемой, — по кольцам равного наклона. Фотография трубы после окончательной доводки изображена на рис. 11, в.

Для трубчатых эталонов из плавленого кварца зеркала также должны быть изготовлены из оптического плавленого кварца, так как при приращении к кварцевой трубе зеркал из стекла или пирекса возможны иска-

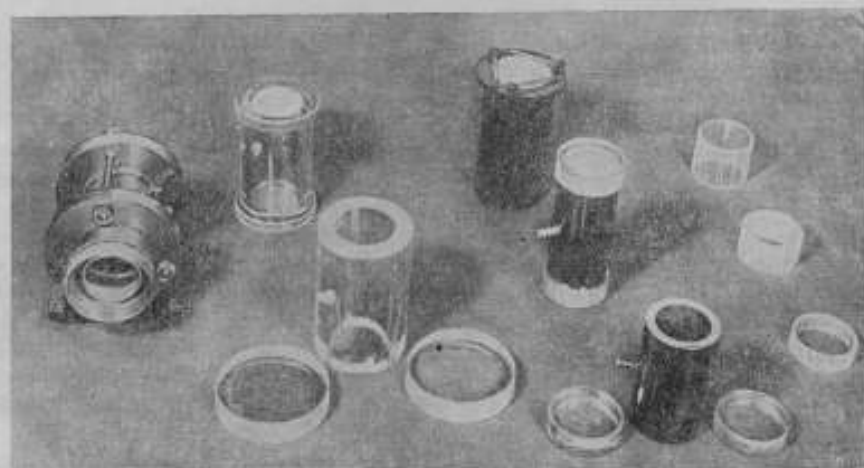


Рис. 12.

жения поверхностей зеркал при изменении температуры из-за различия величины коэффициентов термического удлинения.

При измерении больших концевых мер (до 1000 мм) методом сравнения с трубчатым эталоном длиной 100 мм [9] необходимо, чтобы коэффициенты термического удлинения меры и эталона были близки друг другу по величине так, чтобы разность между длиной меры и в n раз увеличенной длиной эталона не изменялась при изменении температуры.

Для большого горизонтального интерферометра в оптической лаборатории ВНИИМ были изготовлены трубчатые эталоны (длиной 100 мм) из стали той же марки, которую обычно применяют для изготовления плоскопараллельных концевых мер. В качестве заготовок были использованы куски стальных труб с внутренним диаметром 40—50 мм и наружным 50—60 мм, подвергшиеся длительному естественному старению. Доводка плоскостей и параллельности труб эталонов производилась методами, которые применяются при изготовлении концевых плоскопараллельных мер нулевого класса.

При изготовлении стальных эталонов большое значение имеет выбор заготовок. Недостаточная однородность стали, а также недостаточное старение могут привести к изменениям параллельности и длины эталона со временем.

На фотографии (рис. 12) представлены образцы регулируемых и нерегулируемых эталонов, изготовленных в оптической лаборатории.

Создание высококачественных эталонов типа Фабри и Перо, особенно трубчатых, обеспечило возможность выполнения основных метрологических работ в области измерения длин интерференционными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fabry Ch., *Oeuvres choisies* (1938).
2. Фриш С. Э., *Техника спектроскопии*, ЛГУ, 1936.
3. Королев Ф. А., *Спектроскопия высокой разрешающей силы*, Гостехиздат, 1953.
4. Tolansky, «*High resolution spectroscopy*», London (1947).
5. Розенберг, У. Ф. Н., 47, вып. 1 и 2, 1952, стр. 3 и 173.
6. K. W. Meissner, *I. Opt. Soc. of Am.*, v. 31, № 6, p. 405 (1947).
7. Sears and Barrel, *Phil. Tr. of R. S., Ser. A.*, 231, 75—145 (1932).
8. Романова М. Ф., Вардих Г. В., Карташев А. И., Батарчукова Н. Р., *ДАН СССР*, 2, 1942.
9. Романова М. Ф. и Карташев А. И., *Труды ВНИИМ*, вып. 7 (67), 1949, стр. 23.
10. G. Peters and W. Eweson, *Jn of Res. NBS.* 44, 4, 419 (1950).

СПЕЦИАЛЬНАЯ ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ КАМЕРА С ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫМ ОБЪЕКТИВОМ

Современные требования к точности и к технике измерений длины интерференционным методом вызвали необходимость усовершенствования аппаратуры и, в частности, улучшения качества фотографических систем, предназначенных для фотосъемки интерференционной картины.

В одной из предыдущих статей [1] рассматривались изменения, вносимые в изображение интерференционных максимумов остаточными aberrациями оптической системы, фотографирующей интерференционную картину.

Были установлены требования к качеству и основным параметрам оптических систем, применяемых в сочетании с интерферометром высокой разрешающей способности — эталоном Фабри и Перо. На основании этих требований и в соответствии с параметрами наших интерференционных эталонов был рассчитан специальный зеркально-линзовый апохроматический объектив с весьма строгой коррекцией остаточных aberrаций (выполнено Н. Н. Губелем). В этом объективе полностью отсутствуют вторичный спектр и хроматизм увеличения; сферическая aberrация для линии D ($\lambda = 589,3$ мкм) не превышает 0,03 волны в плоскости наилучшего изображения; монохроматические полевые aberrации, в том числе и aberrации внемеридиональных (косых) лучей, — незначительны [2].

В отличие от известных зеркально-линзовых систем, характеризующихся осевой симметрией, этот объектив был запроектирован несимметричным. Такая конструкция позволила устранить один из недостатков симметричных систем — экранирование центральной части зрачка входа, — ухудшающее характер распределения энергии в дифракционном кружке рассеяния. Некоторое усложнение технологии изготовления оптических деталей объектива и его юстировки компенсируется возможностью работать полным зрачком и уменьшенном количестве рассеянного света (вредных рефлексов) в плоскости изображения.

Одним из достоинств нового объектива является отсутствие необходимости в перефокусировке при фотосъемке в лучах различных длин волн вследствие полного отсутствия вторичного спектра (неизбежного в обычных линзовых системах) и хроматизма увеличения.

В настоящей статье дано описание конструкции фотокамеры и методика юстировки объектива, а также приведены способы изготовления несимметричных линз и некоторые результаты исследования камеры.

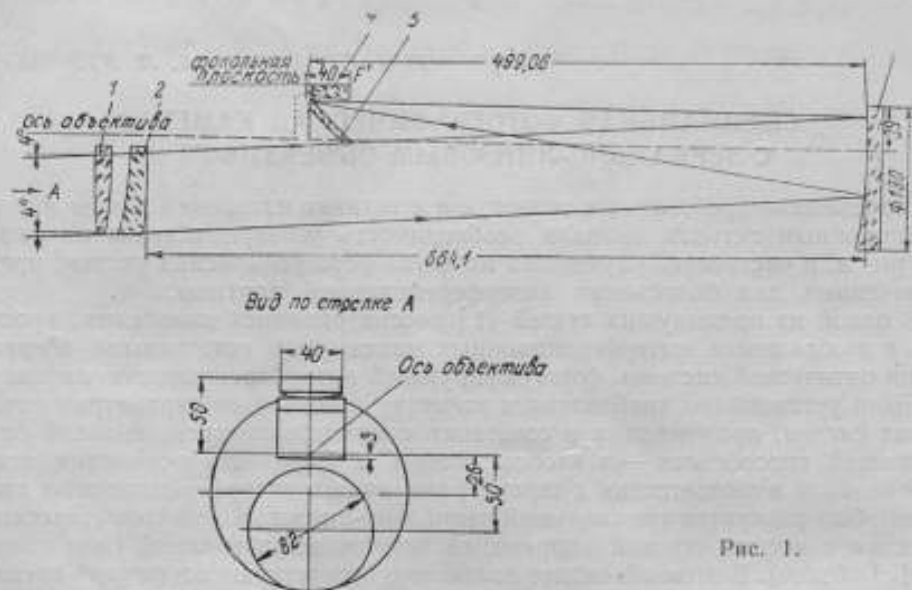
Напомним кратко оптическую схему объектива (рис. 1, а), приводившуюся ранее [2], но в несколько ином варианте (с другим расположением линзы 4, корригирующей кривизну поверхности изображения).

Как видно из рисунка, асимметричные линзы 1 и 2, компенсирующие aberrации, вносимые сферическим зеркалом 3, дают возможность работать полным зрачком без экранирования. Эти линзы изготовлены из стекла одного

сорта, имеют близкую по абсолютной величине, но различную по знаку оптическую силу; они представляют, следовательно, практически афокальную систему, не вносящую хроматизма.

Наклонный пучок параллельных лучей, изображенный на рис. 1 в меридиональном сечении, соответствует максимальному углу поля, равному 4° . Линейное поле объектива ограничено окружностью диаметром 35 мм.

После прохождения через компенсатор (линзы 1 и 2) лучи, отраженные от сферического зеркала 3, падают на плоское зеркальце 5 (расположенное под углом 45°) и собираются на плоской поверхности линзы 4 в фокальной



плоскости всей системы. Лучи, входящие в систему параллельно ее оптической оси, собираются на плоской поверхности линзы 4, вблизи от ее удаленного края.

Для наглядности на рис. 1, б изображен вид по стрелке А.

Оптические характеристики зеркально-линзового объектива:

фокусное расстояние $f = 500$ мм;

относительное отверстие $1 : 6,3$;

поле $2\beta = 4^\circ$.

1. Конструкция камеры

Одним из основных узлов камеры является компенсатор (рис. 2), конструкция которого предусматривает возможность: центровки отрицательной линзы 2 путем смещения ее в плоскости, перпендикулярной оптической оси объектива, а также наклона положительной линзы 1 относительно оптической оси и продольного перемещения ее.

Для выполнения поперечных смещений отрицательной линзы в корпусе компенсатора 3 имеются три прилива, в двух из которых находятся винты для смещения линзы в вертикальном и горизонтальном направлениях, а в третьем — пружина, поддерживающая оправу линзы во время ее перемещения, и стопорный винт, нейтрализующий действие пружины по окончании юстировки.

Положительная линза 1 закреплена в оправе 5, сферическая наружная поверхность которой сопрягается с внутренней конической поверхностью внешней оправы 6; наклоны положительной линзы осуществляются тремя упорными винтами 7. Устройство для крепления и юстировки положительной

линзы соединено с корпусом регулировочным кольцом 4. Винтовая или вывинчивая оправу, можно развернуть положительную линзу вокруг ее оси или изменить расстояние между линзами компенсатора. Внутренние части оправ линз, включая резьбовые кольца, фиксирующие положение линз, не отличаются от обычных, несмотря на асимметрию линз. Такое упрощение конструкции оправ стало возможным благодаря специальным фаскам, компенсирующим неравенство толщины линз по краю.

Корпус камеры (рис. 3) состоит из трех частей:

- а) фланца 1;
- б) средней части 2;
- в) основной трубы 3.

Фланец 1 с компенсатором скреплен болтами со средней частью 2, в которой смонтировано плоское зеркальце 4 и рамка с последней линзой 5. В свою

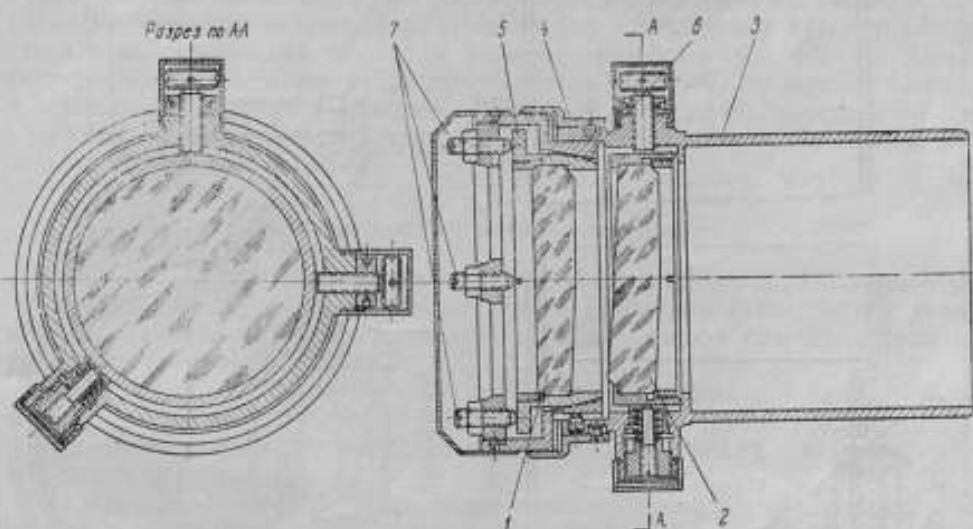


Рис. 2.

очередь средняя часть 2 связана резьбовым соединением с основной трубой 3, несущей сферическое зеркало 6. Все три части выполнены из отливок, подвергшихся последующей механической обработке.

Средняя часть камеры 2 имеет прямоугольный вырез, в который смонтирована рамка с круглым гнездом для оправы линзы 5. В рамке выфрезерован квадратный выступ, на который насаживают кассеты. На рисунке показана кассета в положении готовности к фотосъемке: с открытой шторкой 7 и фотопластинкой, лежащей на плоской поверхности линзы 5. Под рамкой расположено плоское зеркало 4 в оправе, закрепленной на оси 8, проходящей через приливы в стенках корпуса камеры (см. разрез по АА, рис. 3, б). В приливах закреплены втулки, к наружным сферическим поверхностям которых прилегают внутренние сферические поверхности шайб. Это дает возможность производить любые наклоны оси зеркала в пределах зазоров между осью и втулками. По окончании юстировки шайбы закрепляются гайками.

Сферическое зеркало 6 помещено в оправу, имеющую с тыльной стороны прилив, в который входит шаровидная головка винта 9, связывающего эту оправу с оправой 10, жестко закрепленной в корпусе камеры. При юстировке освобождают винт 9, отпуская гайку 11 настолько, чтобы иметь возможность с помощью двух винтов и пружины наклонять зеркало. По окончании юстировки положение оправы зеркала фиксируют третьим винтом.

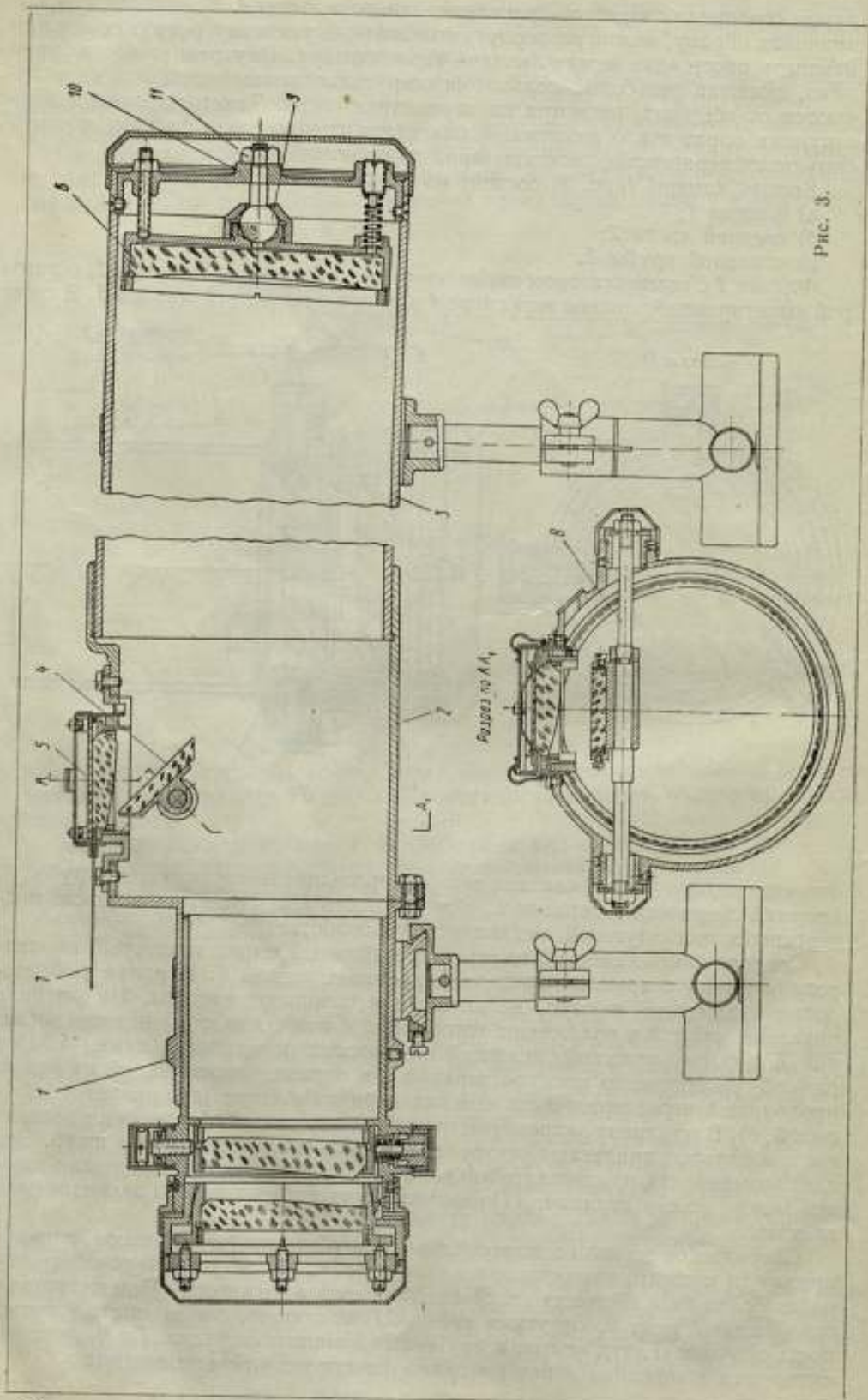


Рис. 3.

Вся камера укреплена на двух специальных подставках, которые могут быть установлены либо на трехгранном рельсе оптической скамьи, либо на столе.

Прежде чем перейти к описанию юстировки и технологии изготовления оптики камеры, остановимся на способе пользования кассетами.

При зарядке кассеты с нее снимают крышку и закладывают пластинку (как обычно, эмульсией к шторке) так, что края пластинки ложатся на две уголки планки. Затем надевают крышку, снабженную двумя плоскими пружинами, и поджимают ими пластинку к планкам. Далее кассету устанавливают (уже на свету) в камеру, для чего ее насаживают на квадратный выступ рамки, сначала на глубину 2—3 мм, а затем, вытаскив шторку, опускают кассету глубже до упора в вырезы рамки. При этом пластинка окажется прижатой к плоской поверхности линзы, выступающей над своей оправой и, следовательно, будет расположена в фокальной плоскости объектива. В случае применения планки, между нею и пружинами крышки кладут стеклянный оклеенный бархатом вкладыш размером 4,5 × 6 см. После фотографирования кассету приподнимают на 2—3 мм, закрывают шторку и снимают с посадочного квадрата. При такой последовательности операций поверхность линзы гарантирована, как показала практика работы с камерой, от каких-либо повреждений.

2. Изготовление оптических деталей

Линзы зеркально-линзового объектива, как указывалось ранее, были несимметричными (геометрические их оси не совпадали с оптической осью, которая находилась вне линз у деталей компенсатора или проходила по краю — у последней линзы).

Технология изготовления таких линз мало разработана и оказалась довольно трудоемкой в условиях оптического участка завода «Эталон».

Наиболее рациональным способом изготовления таких линз нам представлялся следующий:

а) сначала сделать большие симметричные линзы и отцентрировать их на большом центрировочном станке (как обычно);

б) из больших линз вырезать малые (эксцентричные) с помощью трубчатого сверла, ось которого смещена относительно оптической оси больших линз на величину эксцентриситета (в нашем случае на 50 мм).

Этот способ, логически вытекающий из самой конструкции линз и поэтому наиболее надежный и правильный, не мог быть осуществлен на заводе из-за отсутствия соответствующего оборудования. Поэтому был выбран другой вариант: согласно которому заготовками служили две плоскопараллельные стеклянные пластины большого диаметра и соответствующей толщины. Обе пластины были округлены до диаметра $D = 180$ мм.

$$D = 2 \left(e + \frac{d}{2} \right),$$

где e — эксцентриситет геометрического центра относительно оптической оси ($e = 50$ мм);

d — диаметр готовой несимметричной линзы, равный 82 мм.

Кругление производилось с большой точностью, так как цилиндрическая поверхность больших линз являлась базовой, как это будет видно из дальнейшего.

На каждой линзе было отшлифовано по одной сферической поверхности. При этой операции обращали особенное внимание на равнотолщинность края (отсутствие косины). Затем была отшлифована вторая сферическая поверхность. В процессе шлифовки линзы периодически укладывали готовой поверхностью на шлифовальник, имеющий кривизну, обратную кривизне этой поверхности, и с помощью миниметра проверяли равнотолщинность линзы

по краю, для чего ее медленно поворачивали вокруг своей оси. Ножка микрометра находилась все время на постоянном расстоянии от края линзы.

Таким способом были получены большие центрированные линзы. Следует отметить, что центрировка линз по отсутствию косины вместо обычной — по бликам лампочки — была применена вследствие большей точности первого способа при очень пологих радиусах (радиусы кривизны поверхностей имели значения до нескольких метров). Затем отцентрированные большие линзы разрезали на секторы, из которых постепенным круглением получали малые эксцентричные линзы. При круглении оставшуюся часть цилиндрической поверхности (ограничивавшей ранее диаметр большой линзы) снимали в последнюю очередь, после доведения диаметра до требуемой величины (82 мм). Таким образом было обеспечено получение необходимого эксцентриситета, причем базой являлся край большой линзы.

Изложенный выше способ был применен при изготовлении двух линз компенсатора.

Несколько иначе была выполнена малая плосковыпуклая линза диаметром 40 мм, располагаемая в фокальной плоскости объектива. После изготовления исходной симметричной линзы от нее отрезали сегмент несколько большей половины линзы, так что оптическая ось готовой малой линзы была расположена в 2—3 мм от края. Эту часть наклеивали плоской стороной на планшайбу, имеющую диаметр, равный диаметру готовой линзы. При этом круглый край заготовки совмещали с краем планшайбы. Затем производили кругление линзы до тех пор, пока ее диаметр не становился равным диаметру планшайбы.

В заключение на всех линзах были сняты кольцевые фаски, выравнивающие их края, т. е. уничтожающие косину линз по краю. Эти фаски имели переменную ширину по окружности. Их назначение — обеспечить возможность применения нормальных оправ и колец (с торцами, перпендикулярными к осям этих оправ и колец). Фаски снимали шлифовальником, жестко закрепленным под углом 45° на супорте станка, на котором круглили линзы. Что касается сферического зеркала, то оно было сделано симметричным и потому мы не останавливаемся на его изготовлении. Отметим только, что для получения необходимого выноса его центра, зеркало наклоняли. Плоское зеркало было изготовлено достаточно толстым, чтобы оно не деформировалось при закреплении в оправе.

Все оптические детали зеркально-линзового апохроматического объектива были изготовлены оптиками завода «Эталон» Г. С. Ярмолинским и П. П. Яковлевым.

3. Юстировка зеркально-линзовой камеры

Юстировка камеры состояла из следующих основных операций:

- 1) центрировка двухлинзового компенсатора;
- 2) юстировка узла сферического зеркала;
- 3) юстировка плоского зеркала и последней (плосковыпуклой) линзы;
- 4) общая юстировка камеры.

Следует отметить, что вследствие некоторых дефектов конструкции (недостаточно удобные приспособления для наклонов и поперечных перемещений линз компенсатора, узла плоского зеркала и последней линзы) юстировка прибора оказалась трудоемкой. Кроме того, она осложнилась еще и асимметрией линз. Поскольку юстировка компенсатора является более сложной операцией, чем другие, мы остановимся на ней несколько подробнее.

Как указывалось при описании камеры, конструкция оправ деталей компенсатора предусматривала следующие регулировки: наклоны положительной линзы и поперечное перемещение отрицательной.

Для центрировки линз была применена горизонтально расположенная автоколлимационная труба, объектив которой имел фокусное расстояние

около 300 мм и относительное отверстие 1 : 7. С помощью трубы наблюдали автоколлимационные блики от всех четырех поверхностей линз компенсатора. При этом, если для наблюдения блика от самой пологой поверхности требовалось выдвижение окуляра на 12—13 мм, то для наблюдения остальных автоколлимационных бликов были применены специальные насадки. Оптическую силу насадки, предназначенной для получения блика от данной поверхности, подбирали с таким расчетом, чтобы параллельный пучок лучей, вышедший из трубы, после преломления в насадке и на всех предыдущих поверхностях, падал на эту поверхность нормально (вдоль ее радиуса). Очевидно, что такой пучок, отразившись обратно, пойдет по тому же пути и, таким образом, даст автоколлимационное изображение марки.

Приведем порядок расчета насадки для получения блика от последней поверхности отрицательной линзы (рис. 4, поверхность IV).

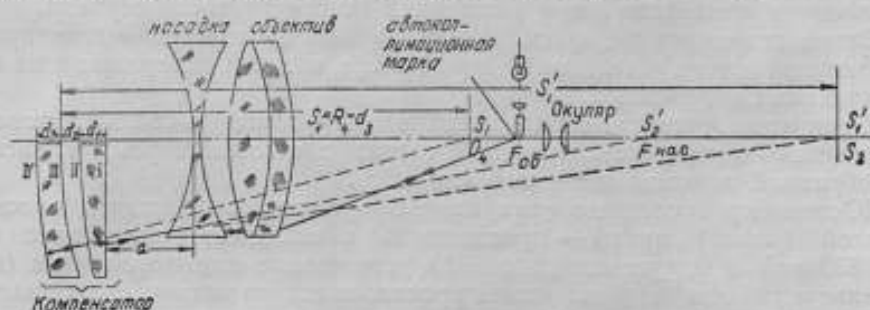


Рис. 4.

Рассмотрим ход лучей в обратном направлении, т. е. от компенсатора к автоколлимационной трубе (для наглядности все поперечные размеры линз на рисунке сильно увеличены по сравнению с их фокусными расстояниями).

Луч, отраженный от поверхности IV в направлении ее радиуса, преломится на поверхности III. Положение промежуточного изображения после преломления можно найти из известного уравнения:

$$\frac{n'}{S'} - \frac{n}{S} = \frac{n' - n}{R}, \quad (1)$$

где в нашем случае:

$$n = 1,5163; \quad n' = 1; \quad R = R_3; \quad S = R_4 - d_1;$$

R_3 — радиус кривизны поверхности III;

R_4 — радиус кривизны поверхности IV;

d_1 — толщина отрицательной линзы компенсатора.

Из уравнения (1) находим S' (в данном случае S_1'). Далее, после преломления через положительную (первую) линзу промежуточное изображение получится на расстоянии $S_2' = S_1'$, определяемом уравнением:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{S'} - \frac{1}{S}.$$

В данном случае

$$S = S_2 = S_1' - d_2,$$

где d_2 — величина воздушного промежутка между линзами.

Фокусное расстояние насадки, очевидно, должно быть равным:

$$f_n' = -(S_2' - a),$$

где a — расстояние от компенсатора до насадки.

Таким же способом были рассчитаны остальные две насадки¹.

¹ Ход луча можно было определить и по известным типовым схемам расчета параксиальных лучей.

Центрировка компенсатора заключалась в приведении всех четырех бликов от центрируемых поверхностей линз на оптическую ось трубы (в центр поля), что и осуществлялось наклонами и поперечными перемещениями линз.

Естественно, что насадочные линзы были строго центрированы. Были приняты также меры для того, чтобы при движении окулярной части марка сетки окуляра не смещалась в поперечном направлении.

При центрировке узла компенсатора выявилась возможность упростить эту операцию поперечными перемещениями первой линзы.

В процессе юстировки особое внимание обращали на совмещение главных сечений обеих линз в одной плоскости, что достигалось поворотом одной из линз вокруг ее геометрической оси. Несоблюдение этого условия приводило к созданию оптического клина, а следовательно, — к хроматизму.

После юстировки компенсатор был установлен в корпусе камеры и закреплен на соответствующем расстоянии от сферического зеркала.

Затем наклонами сферического зеркала была произведена его юстировка, заключающаяся в приведении центра его сферической поверхности на оптическую ось компенсатора.

Блик от поверхности зеркала наблюдали с помощью той же автоколлимационной трубы, установленной соосно с компенсатором, и насадки, подобранной изложенным ранее способом.

Юстировку последнего узла камеры — плоского зеркала и плосковыпуклой (малой) линзы — производили с помощью коллиматора ($f' = 1630$ мм), в фокусе которого была установлена штриховая мира (испытательная таблица), и горизонтально расположенного микроскопа. С помощью микроскопа наблюдали изображение миры, расположенное в фокальной плоскости зеркально-линзового объектива.

Камера была установлена так, что ось объектива была параллельна оси коллиматора. Это достигалось установкой опорного торца объектива перпендикулярно оси коллиматора, для чего к торцу прикладывали плоское зеркало, а в коллиматор вставляли автоколлимационный окуляр.

После установки плоского зеркала и малой линзы, наклонами зеркала приводили изображение миры на край линзы (на ее оптическую ось), куда по расчету и должны сходиться лучи нулевого наклона.

Затем коллиматор наклоняли под разными углами в пределах от 0 до 4° (расчетное поле объектива) и добивались совмещения плоской поверхности линзы с фокальной плоскостью объектива (для чего линзу также приходилось наклонять и двигать вдоль оси объектива); после этого линзу закрепляли.

Недостаточно совершенная конструкция узлов плоского зеркала и последней линзы значительно усложнила заключительную часть юстировки.

Окончательная юстировка всего объектива состояла из последовательных тонких перемещений и наклонов сферического зеркала, плоского зеркала и малой линзы до тех пор, пока изображение миры коллиматора, наблюдаемое в микроскоп, не стало удовлетворять требованиям, предъявляемым к объективу как высококачественной оптической системе, а именно:

1. Разрешающая способность объектива по всему полю при визуальном наблюдении приблизилась к расчетной (230 штрихов на миллиметр), и равнялась в центре поля примерно 200 штрихов на миллиметр.

2. Изображение миры, даваемое объективом, удовлетворительно совпало с плоскостью последней линзы по всему полю.

4. Испытание фотокамеры

Для выяснения возможностей камеры было произведено визуальное изучение изображения испытательной таблицы (миры) и удаленных объектов, а также фотографирование интерференционных колец при разности хода эталона Фабри и Перо 92 мм.

Мира, установленная в фокальной плоскости коллиматора ($f' = 1630$ мм), представляла собой фотоснимок большого испытательного щита обычного вида, разделенного на 25 групп квадратов (по 4 квадратика в каждой) со штрихами различных направлений. В фокальной плоскости испытуемого зеркально-линзового объектива изображение всей миры получалось уменьшенным примерно в 3,3 раза (соответственно отношению фокусных расстояний объективов коллиматора и камеры) и представляло собой квадрат со сторонами 0,3 мм.

Изучение изображения миры при помощи микроскопа с увеличением $40\times$ в различных участках фокальной плоскости показало, что пределом разрешения объектива является группа квадратиков с угловым расстоянием

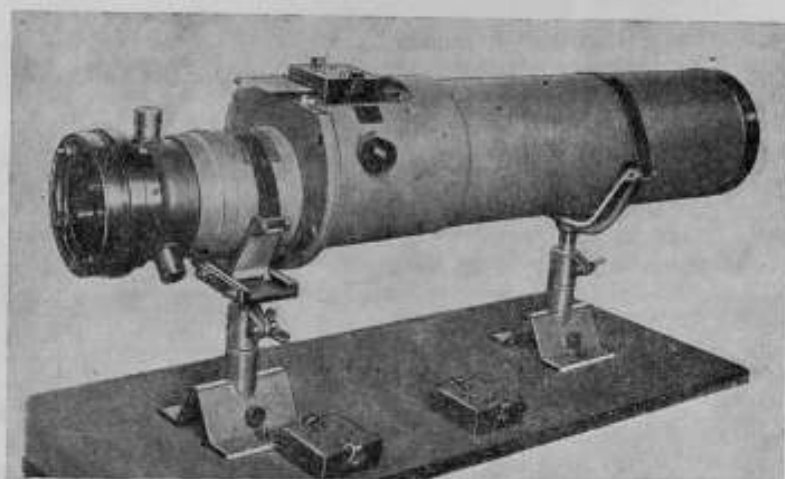


Рис. 5.

между штрихами $1,85''$. Теоретическая разрешающая способность должна была равняться $1,75''$, если для подсчета этого предела пользоваться выражением:

$$\varepsilon = \frac{140}{D},$$

где ε — разрешающая способность объектива (в секундах);

D — диаметр объектива (в миллиметрах).

Одновременно было установлено отсутствие цветных ореолов по краям штрихов, что характеризует достаточно полное исправление хроматических aberrаций.

При визуальном изучении изображения удаленных объектов мы рассматривали с помощью лупы изображение, даваемое объективом камеры. Оказалось, что наименьший разрешаемый объект имел угловую величину порядка $2''$ (в линейной мере приблизительно 20 мм при дистанции 2 км).

Заключительным этапом испытаний явилось фотографирование интерференционных колец, полученных с помощью эталона Фабри и Перо ($2d = 92$ мм) при освещении кадмиевой лампой с накаливаемыми электродами. Эти испытания показали, что новый объектив с фокусным расстоянием 500 мм и относительным отверстием 1 : 6,3 обеспечивает высокое качество изображения и обладает высокой разрешающей способностью. В частности, при исследовании контура спектральных линий сравнение микрофотограмм

интерференционных колец, сделанных зеркально-линзовым объективом, с микрофотограммами, сделанными двухлинзовым астрономическим объективом (фокусное расстояние 800 мм, относительное отверстие 1 : 12), показало преимущество первого.

Построенная нами камера, изображенная на рис. 5, несомненно может найти более широкое применение, чем то, на которое она была вначале рассчитана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стракув Г. И., ИАН СССР, серия физическая, Т14, 6, 1950
2. Стракув Г. И., Труды ВНИИМ, вып. 16 (76), 1951, стр. 13.

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕНСИТОМЕТРА

В стандартных сенситометрах типа ФСР-4 используются лампы накаливания типа СЦ-62, цветовая температура которых, согласно ГОСТ 2817—50 [1], должна быть равна $2850 \pm 20^\circ \text{K}$.

В целях дальнейшего повышения точности воспроизведения единиц светочувствительности фотографических материалов весьма важно иметь возможность контролировать постоянство цветовой температуры источника света в условиях сенситометра в пределах допуска, установленного ГОСТ. Для этого в сенситометрической лаборатории был разработан объективный фотоэлектрический прибор, основанный на использовании метода красно-синего отношения для нахождения цветовой температуры исследуемого источника.

Из литературных данных [2] известны следующие принципиально различные методы определения цветовой температуры T_c , в основе которых лежит сравнение излучения изучаемого источника с излучением абсолютно черного тела:

а) искомая цветовая температура T_c равна температуре абсолютно черного тела, имеющего в видимом спектре то же относительное спектральное распределение энергии, как и рассматриваемый излучатель;

б) цветовая температура T_c изучаемого источника равна температуре черного тела, при которой оно имеет отношение интенсивностей монохроматического излучения для двух длин волн, равное отношению интенсивностей для тех же длин волн в излучении исследуемого тела. Это определение цветовой температуры носит название метода красно-синего отношения;

в) цветовая температура T_c рассматриваемого излучателя соответствует температуре черного тела, при которой его излучение имеет тот же цвет, что и излучение изучаемого тела; этот метод носит название метода идентификации цвета.

Вольфрам, применяющийся в лампах накаливания, является селективным излучателем, коэффициент поглощения которого при температуре накала (рабочей температуре) меньше единицы и зависит от длины волны. Температурные излучатели, коэффициент поглощения которых не изменяется с длиной волны, дают распределение энергии, пропорциональное распределению энергии излучения абсолютно черного тела, и носят название — с е р ы е и з л у ч а т е л и. В пределах видимого спектра вольфрам можно с достаточной степенью приближения считать серым телом. Излучение серого тела пропорционально излучению абсолютно черного тела, имеющего ту же температуру.

Основываясь на аналитической зависимости излучений абсолютно черного тела и серого тела от длины волны, можно для определения цветовой температуры воспользоваться методом нахождения красно-синего отношения.

Для этого достаточно измерить отношение интенсивностей излучений источника для двух длин волн или для двух узких спектральных участков (например, в красной и в синей области спектра) и отыскать температуру черного тела, для которого это отношение интенсивностей имеет то же значение. Вместо того, чтобы делать эти измерения по отношению к черному телу, можно их выполнить по отношению к какому-нибудь серому излучателю, цветовая температура которого известна.

В качестве такого излучателя была принята группа из шести образцовых ламп с вольфрамовыми спиралями. Лампы были взяты двух типов: четыре лампы прожекторного типа с двойной вертикальной спиралью и две лампы типа СЦ-62 с конусообразной горизонтальной спиралью. Лампы типа СЦ-62 применяются во всех стандартных сенситометрах типа ФСР-4

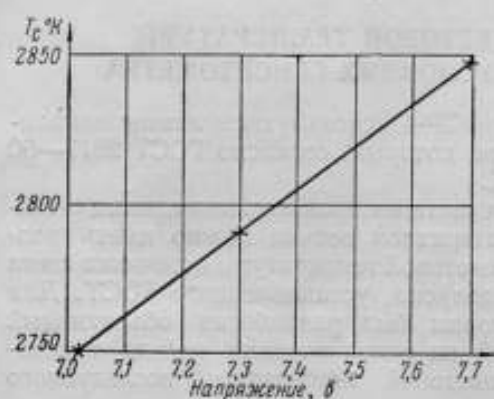


Рис. 1.

Каждая лампа имела удостоверение, выданное фотометрической лабораторией ВНИИМ, с указанием соответствующего режима питания при цветовой температуре $T_c = 2850^\circ \text{K}$.

Чтобы выяснить зависимость цветовой температуры ламп от величины напряжения, прикладываемого к вводам, фотометрической лабораторией ВНИИМ была выполнена дополнительно такая градуировка для одной из принятых шести ламп. На рис. 1 приведены результаты этой градуировки. Из кривой зависимости цветовой температуры лампы от величины напряжения видно, что при изменении напряжения на вводах

лампы на 1% цветовая температура изменяется при этом на 10°K . Режим лампы в сенситометре поддерживается при помощи вольтметра класса 0,5, т. е. с погрешностью в 0,5%.

Следовательно, электроизмерительные приборы позволяют поддерживать цветовую температуру в сенситометре с точностью $\pm 5^\circ \text{K}$. В дальнейшем данные этой градуировки были использованы для получения градуировочной кривой, приведенной на рис. 4.

1. Требования к светофильтрам для определения сине-красного отношения

Для определения T_c источника света в сенситометре в приборе применен объективный фотоэлектрический метод нахождения сине-красного отношения. Приемником лучистой энергии служит селеновый фотоэлемент с двумя светофильтрами, вырезающими сравнительно узкие части видимого спектра в синей и красной его областях.

При выборе светофильтров приняты следующие условия:

а) светофильтры должны вырезать сравнительно узкие спектральные участки, далеко отстоящие друг от друга, в пределах видимого спектра, т. е. в синей и красной его областях;

б) ультрафиолетовые и инфракрасные излучения должны быть устранены, т. е. срезаться светофильтрами;

в) спектральное пропускание светофильтров по возможности не должно зависеть от температуры окружающего воздуха;

г) фототоки, развиваемые вентильным фотоэлементом, при применении как синего, так и красного светофильтров должны быть примерно равны. При этих условиях точность измерений будет наибольшей.

В качестве синего светофильтра в приборе выбрана комбинация из трех следующих стеклянных светофильтров:

стекло СС8 толщиной $5,8 \pm 0,2$ мм
 стекло WGI (Шотт) толщиной $5,0 \pm 0,2$ мм
 стекло СЗС10 толщиной $1,0 \pm 0,1$ мм

Спектральное пропускание изготовленных светофильтров измерено на спектрофотометре типа СФ-4. На рис. 2 показана зависимость величины оптической плотности выбранных светофильтров от длины волны.

Красный светофильтр прибора состоит из желатиновой пленки К1, заклеенной между двумя бесцветными оптическими стеклами сорта К8, и из стеклянных светофильтров СЗС10 и WGI толщиной $1,0 \pm 0,1$ мм.

Желатиновой пленке К1 отдано предпочтение перед красным стеклянным светофильтром (окрашенным в массу), так как при использовании пленки

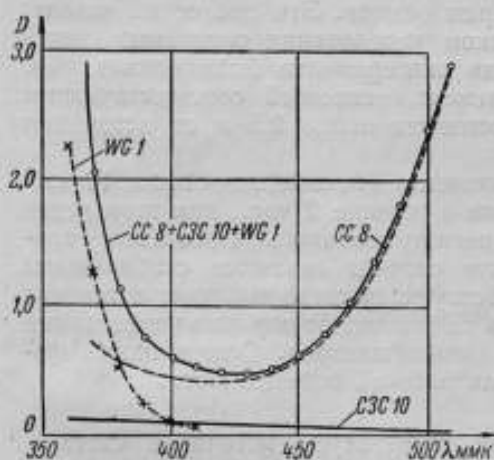


Рис. 2.

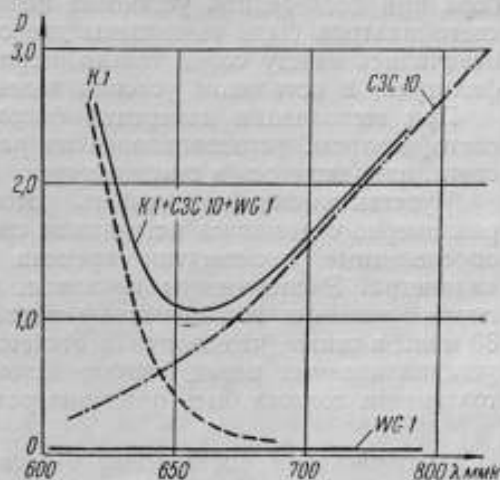


Рис. 3.

можно ожидать уменьшения температурного влияния на пропускание светофильтра. Известно, что спектральное пропускание красных, а также оранжевых и желтых стекол, окрашенных коллоидально, например, селеном, в большой степени зависит от температуры. Это влияние сказывается в значительно меньшей степени на желатиновых светофильтрах, окрашенных, по видимому, молекулярно. Желатиновый светофильтр, в сочетании со стеклянным светофильтром СЗС10, не пропускает инфракрасных излучений и вырезает довольно узкую область светового потока в красной части спектра.

На рис. 3 приведена зависимость величины оптической плотности от длины волны для красного светофильтра и его составляющих.

Из конструктивных и других соображений светофильтр, состоящий из стекла WGI и СЗС10, т. е. срезающий ультрафиолетовую и инфракрасную области спектра, постоянно находится на фотоземле, тогда как красный и синий светофильтры (СС8, К1) сменяются; поэтому в каждом измерении участвуют одновременно три светофильтра.

Одним из требований, предъявленных к красному и синему светофильтрам, является примерное равенство фототоков, развиваемых фотоземлем, используемым в сочетании с этими светофильтрами. При выборе светофильтров был сделан подсчет потоков лучистой энергии, воздействующей на фотоземлемент после прохождения через синий или красный светофильтры.

Величина монохроматического потока лучистой энергии A_λ , воспринимаемого фотоземлемом после прохождения через синий светофильтр, была вычислена по формуле:

$$A_\lambda = E_{\lambda 2850} \cdot K \cdot V_\lambda \cdot T_{\lambda \text{CC8}} \cdot T_{\lambda \text{C3C10}} \cdot T_{\lambda \text{WGI}}$$

где $E_{\lambda 2850^{\circ}K}$ — энергия излучения лампы $T_c = 2850^{\circ}K$ для длины волны λ ; (энергия излучения при $\lambda = 590$ мкм принята за единицу);
 V_{λ} — средняя относительная спектральная чувствительность фотоэлемента (при $\lambda = 590$ мкм принята за единицу);

$\left. \begin{matrix} T_{\lambda CC8} \\ T_{\lambda C3C10} \\ T_{\lambda WG1} \end{matrix} \right\}$ — монохроматические пропускания примененных светофильтров.

Такой же подсчет был сделан применительно к красному светофильтру.

2. Стабильность результатов определений сине-красного отношения при поочередном применении синего и красного светофильтров

Для проверки степени стабильности показаний фотоэлектрического прибора при поочередной установке перед фотоэлементом синего и красного светофильтров были выполнены две серии опытов. Эти две серии опытов отличались между собой только порядком чередования сменяемых светофильтров; в остальном условия ведения эксперимента были одинаковыми.

При выполнении измерений фотоэлемент, закрытый соответствующим светофильтром, устанавливался на расстоянии около 2,5 м от источника света, находящегося в сенситометре.

Чувствительная поверхность фотоэлемента площадью около 10 см^2 равномерно освещалась источником света в течение 2 час., при этом через определенные промежутки времени регистрировалось показание гальванометра. Эксперименты показали, что отсчеты делаются стабильными после освещения фотоэлемента с соответствующим светофильтром в течение 30 мин., а также, что величина отсчетов не зависит от порядка чередования устанавливаемых перед фотоэлементом светофильтров. Освещенность фотоэлемента должна быть примерно равна рабочей освещенности.

3. Прибор для определения цветовой температуры источника света в сенситометре

Прибор состоит из следующих частей:

а) стабильного селенового фотоэлемента, закрытого постоянными светофильтрами типа WG1 и C3C10;

б) двух переключающихся светофильтров: синего CC8 и красного K1;

в) держателя, на котором укреплен фотоэлемент и светофильтры;

г) гальванометра.

Прибор с помощью держателя устанавливается на приспособление к сенситометру ФСР-4, предназначенное для испытания фотобумаг.

Селеновый фотоэлемент соединен с чувствительным гальванометром, который измеряет фототок при освещении фотоэлемента попеременно через синий и красный светофильтры.

По градуировочной кривой (рис. 4), выражающей зависимость между находимым с помощью данного прибора сине-красным отношением и цветовой температурой, определяют цветовую температуру проверяемой лампы.

Селеновый фотоэлемент изготовлен специально для измерительных целей. Фотоэлемент тщательно проверен в отношении стабильности получаемых результатов, а также на равномерность чувствительности поверхности. Однако в данных условиях применения (равномерный поток), последнее обстоятельство не имело значения. Чувствительность фотоэлемента составляет $350 \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}$, э. д. с. холостого хода при 10 люксах равна 166 мв. Действующая поверхность фотоэлемента равна 10 см^2 . Защитное стекло фотоэлемента заменено светофильтром из стекол WG1 и C3C10. Гальванометр типа ГПЗ-2 имеет чувствительность 1960 мв/мкА, внутреннее сопротивление прибора 675 ом, внешнее критическое сопротивление 50 000 ом, период 2 сек.

Поскольку измерения относительны и отклонения гальванометра примерно одинаковы как при градуировке прибора, так и при определении синие-красного отношения, то погрешности, вносимые гальванометром, лежат в пределах точности метода.

При измерении цветовой температуры прибор устанавливается на приспособление сенситометра перед окном его фонаря. Прибор может перемещаться вдоль направляющей приспособления и укрепляется на таком расстоянии от источника света, чтобы отклонение гальванометра было близким к наибольшему.

Замена синего светофильтра на красный осуществляется с помощью направляющей, в которой свободно передвигается оправа со светофильтрами. Измерения синие-красного отношения выполняются в темном помещении, где посторонний рассеянный свет, а также все отражения тщательно устранены применением диафрагм из черного бархата. Перед каждым измерением фототока при нахождении синие-красного отношения фотоэлемент с соответствующим светофильтром облучался от источника света в течение 30 мин.

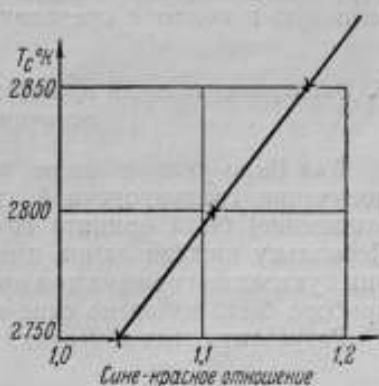


Рис. 4.

4. Влияние температуры окружающего воздуха на селеновый фотоэлемент в сочетании с синим и красным светофильтрами

Поскольку температура окружающего воздуха может влиять на величину измеряемого фототока как вследствие воздействия на фотоэлемент, так и на светофильтры, то были выполнены измерения, имевшие целью выяснить количественную зависимость величины находимого синие-красного отношения от температуры среды. Для выполнения этих исследований были найдены значения синие-красного отношения для источника света $T_c = 2850^\circ\text{K}$, при условии, что приемник световой энергии (фотоэлемент со светофильтром) находился каждый раз длительное время при различных температурах окружающего воздуха, которые изменялись в пределах от 4 до 35°C . Для создания определенного температурного режима было использовано термостатирующее устройство, представляющее собой чугунную камеру цилиндрической формы, имеющую двойные стенки. Задняя стенка камеры плотно закрывалась чугунной крышкой, а переднее отверстие камеры — прозрачным защитным стеклом. Внутри камеры (на расстоянии в несколько сантиметров от этого стекла) устанавливался фотоэлемент с соответствующим светофильтром; чувствительная поверхность фотоэлемента была обращена к стеклу, на которое падал световой поток, исходящий от источника света. Между двойными стенками камеры циркулировала вода; необходимая температура воды поддерживалась с помощью льда или нагревающего устройства.

Температура в камере регистрировалась специальным термометром, установленным вблизи фотоэлемента. Камера с фотоэлементом и соответствующим светофильтром устанавливалась на расстоянии около 2,5 м от источника света. Во время всех измерений накал лампы поддерживался строго постоянным. Значения синие-красного отношения были найдены для шести различных температур.

Исследования показали, что при изменении температуры окружающего воздуха в интервале 4 — 35°C , т. е. на 31°C , величина синие-красного отношения меняется на 0,03. Иными словами, изменение температуры

окружающего воздуха на 31°C изменяет отсчитываемую цветовую температуру на 20°K . Обычно, в лабораторной практике колебание температуры окружающей среды не превышает $\pm 5^{\circ}\text{C}$, что дает ошибку соответственно меньшую и лежит в пределах точности самого метода.

5. Экспериментальная проверка прибора для контроля цветовой температуры источника света в сенситометре

Как было указано выше, в качестве образцового серого излучателя для получения градуировочной кривой (цветовая температура — синие-красное отношение) была принята группа образцовых ламп, состоящая из 6 шт. Поскольку каждая лампа имела удостоверение фотометрической лаборатории с указанием режима при цветовой температуре $T_c = 2850^{\circ}\text{K}$, то с помощью прибора было измерено синие-красное отношение для каждой из этих ламп.

Результаты этих измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ лампы	Данные фотометрической лаборатории. Режим лампы $T_c = 2850^{\circ}\text{K}$		Показания гальванометра		Синие-красное отношение
	напряжение в абсолютных вольтах	сила тока в абсолютных амперах	синий свето-фильтр	красный свето-фильтр	
54	7,70	7,670	130,1 ₅	108,9 ₅	1,194
53	9,14	7,515	141,8 ₆	120,1 ₄	1,180
187	17,90	3,976	131,8 ₂	111,8 ₆	1,178
168	8,40	6,895	112,2 ₅	97,9 ₆	1,146
182	9,63	7,073	132,9 ₆	114,0 ₆	1,174
183	9,60	7,072	139,8 ₆	118,9 ₆	1,175

Среднее значение синие-красного отношения для группы ламп равно $1,17_5$; вероятная погрешность результата составляет 0,009.

Градуировочная кривая, изображающая зависимость синие-красного отношения от цветовой температуры, является, как известно (в пределах небольшого интервала температур), прямой линией. Эта прямая проходит при $T_c = 2850^{\circ}\text{K}$ через точку, соответствующую вышеприведенному синие-красному отношению $1,17_5$. Наклон прямой получен путем измерения синие-красных отношений для ряда цветových температур одной из образцовых ламп (рис. 1). Таким образом, получена градуировочная кривая данного прибора (рис. 4).

Как было указано выше, ГОСТ 2817—50 требует, чтобы цветовая температура в лампах сенситометра поддерживалась в пределах $T_c = 2850 \pm \pm 20^{\circ}\text{K}$.

Из рассмотрения градуировочной кривой (рис. 4) видно, что для выполнения этого требования ГОСТ величина синие-красного отношения, измеряемая прибором, должна находиться в пределах от 1,14 до 1,20. Лампы, не удовлетворяющие этим требованиям, должны считаться непригодными для установки в сенситометрах.

Для выяснения степени воспроизводимости градуировочной кривой, получаемой по группе образцовых ламп, были выполнены повторные измерения через полгода. Результаты этих измерений показали, что воспроизводимость показаний прибора при получении отдельных точек градуировочной кривой хорошая и лежит в пределах $\pm 3^{\circ}\text{K}$. Прибор желательно проверять не реже одного раза в год.

На основании изложенного, можно прийти к заключению, что лабораторией создан прибор, который позволяет контролировать цветовую температуру источника света в сенситометре с точностью, требуемой ГОСТ 2817—50, т. е. в пределах $\pm 20^\circ \text{K}$.

Сравнение результатов измерения цветовой температуры источника света в условиях сенситометра с данными измерений фотометрической лаборатории по методу «идентификации цвета» показывает, что средняя величина расхождений между определениями T_c двумя методами составляет $\pm 6^\circ \text{K}$.

Созданный прибор используется при поверках сенситометрической аппаратуры различных ведомств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод общесенситометрического испытания, ГОСТ 2817—50.
2. Р и б о, Оптическая пиометрия, ГТТИ, 1934.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Н. Р. Батарчукова, А. И. Карташев и М. Ф. Романова, Кадмиевые одноизотопные источники света	5
2. А. И. Карташев, Новый метод измерения скорости света	17
3. М. Л. Бржезинский, Универсальный интерференционный компаратор	37
4. Е. А. Волкова, А. И. Карташев, М. Ф. Романова и В. С. Степанов, Универсальный интерферометр системы ВНИИМ для измерения концевых мер и геодезических кварцевых жезлов длиной до 1200 мм	43
5. Е. А. Волкова и И. П. Владимиров, Исследование универсального интерферометра системы ВНИИМ для измерения концевых мер и геодезических жезлов длиной до 1200 мм	51
6. А. И. Карташев, Фотоэлектрический профилоскоп	57
7. Н. Р. Батарчукова и И. П. Владимиров, Опыт по изготовлению интерференционных эталонов типа Фабри и Перо	66
8. Г. И. Стракун и А. Л. Курицкий, Специальная фотографическая камера с зеркально-линзовым объективом	75
9. В. А. Коридорф и И. Н. Черныи, Прибор для контроля цветовой температуры лампы накаливания в условиях сенситометра	85

Технический редактор Л. В. Соколова

Корректор В. М. Хорошкелюк

Подписано к печати 16/VII 1955 г. М-43831

Формат 70×180/16

Печ. листов 7,88

Уч.-изд. листов 7,5

Тираж 600 экз.

Заказ 1776



