

Д.Д. Максудов

**Оптические плоскости, их
исследование и изготовление**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Д11

Д11 **Д.Д. Максutow**
Оптические плоскости, их исследование и изготовление / Д.Д. Максutow – М.:
Книга по Требованию, 2014. – 90 с.

ISBN 978-5-458-41103-5

Настоящая работа не претендует на исчерпание темы, поставленной в заголовке книги. Автор, работая над исследованием и изготовлением больших оптических плоскостей, желает лишь поделиться той методикой, которую он считает в данной случае наиболее целесообразной. Остановившись в этом смысле на методе Фуко-Коммона, автор пытается изложить его возможно подробнее, так как с одной стороны литература по данному вопросу очень бедна, а с другой стороны этот метод был подвергнут автором в стенах ГОИ значительной разработке и углублению, не освещенным до сего времени в литературе. Наконец, автор совершенно сознательно лишь вскользь затрагивает методы исследования плоскостей, отличные от метода Фуко-Коммона, так как во-первых они достаточно подробно изложены не только в иностранной, но и в русской литературе и во-вторых они нужны автору лишь для подтверждения их несостоятельности при исследовании достаточно больших плоскостей.

ISBN 978-5-458-41103-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая работа не претендует на исчерпание темы, поставленной в заголовке книги.

Автор, работая над исследованием и изготовлением больших оптических плоскостей, желает лишь поделиться той методикой которую он считает в данном случае наиболее целесообразной.

Остановливаясь в этом смысле на методе Фуко-Коммона автор пытается изложить его возможно подробнее, так как с одной стороны литература по данному вопросу очень бедна, а с другой стороны этот метод был подвергнут автором в стенах ГОИ значительной разработке и углублению, не освещенным до сего времени в литературе.

Наконец, автор совершенно сознательно лишь вскользь затрагивает методы исследования плоскостей, отличные от метода Фуко-Коммона, так как во-первых они достаточно подробно изложены не только в иностранной, но и в русской литературе и во-вторых они нужны автору лишь для подтверждения их несостоятельности при исследовании достаточно больших плоскостей.

Д. Максудов
(Май 1934 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Почти на каждом шагу техника встречается с задачей изготовления и исследования плоских поверхностей. Городские площади и тротуары, полы и стены зданий, поверхности столов, полок, оконные стекла, туалетные зеркала, плоские калибры, наконец астрономические целлоstatные зеркала, — все это плоскости в идеале, но воспроизводимые нами с большими или меньшими ошибками.

Допустимые ошибки таких поверхностей, т. е. их отклонения от идеальной плоскости, в большинстве случаев устанавливаются рационально и целесообразно, и если в одних случаях допуск измеряется сантиметрами и миллиметрами, то в других случаях — десятками и сотыми миллиметра, а в третьих — микронами и даже долями световой волны.

В соответствии с допуском методы и приборы для исследования плоских поверхностей будут различными, начиная от тугонатянутой бечовки, отвеса, уровня, линейки и кончая оптической линейкой, сферометром, стеклянной плоской пробой и тепловым методом исследования плоскостей.

Из плоскостей, изготавливаемых человеком, наиболее точными являются плоскости оптические: природа не умеет воспроизводить таких точных плоскостей, как оптические.

Достаточно сказать, что оптику приходится устранять ошибки на полируемых плоскостях в тех случаях, когда эти ошибки превосходят $\frac{1}{20}$ долю световой волны. В переводе на метрические меры этот допуск равен $\frac{25}{100\,000}$ мм, если рассматривать явление для зеленых лучей; но оптическое зеркало может быть предназначено и для других лучей, имеющих значительно меньшую длину волны, а тогда допуск, выраженный в долях миллиметра, окажется еще более строгим.

Наконец, эталонные оптические плоскости, а также плоскости для специальных исследований, могут быть заданы с еще большей точностью.

Чем же вызвана необходимость такой высокой точности изготовления оптических плоскостей? Не является ли она излишней роскошью и если нет, то где же границы нашего приближения к идеальной плоскости? Не являются ли эти границы достижимыми лишь в идеале, т. е. практически никогда не достижимыми?

Как сама точность, так и границы ее повышения продиктованы и заданы волновой природой света.

Если отраженная или преломленная плоскостью световая волна деформируется на значительную величину, то оптическая система, в состав которой входит данная плоскость, не нарисует нам вполне четкого изображения, — не проявит всей своей „теоретической разрешающей силы“.

По мере уменьшения ошибок плоскости, уменьшаются и деформации волновой поверхности, а разрешающая сила оптической системы возрастает.

Но вот мы доходим до столь малых ошибок оптической поверхности, а вместе с тем и до столь малых деформаций волновой поверхности, что изображение точки представляется нам в виде диффракционного кружка, окруженного диффракционными кольцами.

Дальнейшее улучшение оптической поверхности влечет за собой заметное вначале, но скоро прекращающееся, повышение яркости диффракционного кружка и вместе с тем убывание яркости диффракционных колец.

Дальше этого предела нет смысла повышать точность изготовления оптической поверхности, так как дальше растущая точность не изменяет практически диффракционной картины, т. е. не повышает разрешающей силы системы.

Когда деформации волновой поверхности (ее отклонения от сферы) снизятся примерно до $0,1\lambda$, мы получаем практически совершенное изображение, т. е. используем и количественно и качественно теоретическую разрешающую силу оптической системы.

Таким образом природа света задала нам допуск и указала верхнюю рациональную границу этого допуска.

Оптические системы, в которых сходящаяся к фокусу волновая поверхность не уклоняется от сферы более чем на $0,1$ длины световой волны, мы назовем первоклассными для данной длины волны.

Как мы увидим дальше, зональные ошибки плоского зеркала, расположенного перпендикулярно к падающей волне, вызывают удвоенные деформации отраженной волновой поверхности; поэтому для такого первоклассного зеркала допустимы зональные ошибки не более $0,05\lambda$.

Но если система состоит из нескольких зеркал, и если в них возможны ошибки с одинаковым знаком, например завал на краю поверхности, то такие ошибки будут суммироваться, а потому, если мы не располагаем возможностью исследования системы в целом с последующей компенсацией ошибок на одной из поверхностей системы, — мы вынуждены полировать поверхность каждого зеркала с удвоенной, утроенной и т. д. точностью, против точности в $0,05\lambda$, в зависимости от числа зеркал, вхо-

дящих в систему. Однако не во всех случаях и компенсация ошибок достигает цели: так например, в целостатных зеркалах ошибки могут быть скомпенсированы для некоторого определенного взаимного расположения зеркал, но, по мере того как расположение зеркал и их наклон будут изменяться (а целостатные зеркала подвижны), скомпенсированные прежде ошибки начнут теперь проявляться и портить качество изображения.

Для того чтобы изготовить поверхность с ошибками, не превышающими малых долей световой волны, необходимо прежде всего научиться измерять эти ошибки с еще большей точностью.

Оптические методы исследования, надлежащим образом поставленные, позволяют измерить ошибку порядка $0,01\lambda$, а уловить, но не измерить ошибки и еще того меньшие. А это уже совершенно исключительная чувствительность, известная только специалисту-оптику, вооруженному своеобразной методикой оптических исследований.

Как допуск для первоклассных оптических систем, так и порог чувствительности методов исследования оптических поверхностей устанавливает нам природа света.

Зеркало, отполированное как первоклассное для желто-зеленых лучей, перестает быть им при переходе к лучам фотографическим и тем более к лучам ультрафиолетовым, так как длины волн этих лучей (λ) стали короче, а наш допуск пропорционален длине волны, обуславливающей диффракционную картину изображения точки и теоретическую разрешающую силу системы.

Поэтому, по мере того как мы в своих исследованиях все дальше и дальше углубляемся в область коротких волн, возрастает необходимая точность изготовления первоклассной поверхности. Вместе с этим возрастает и трудность изготовления такой поверхности даже в том случае, если мы обеспечены надлежащей методикой исследования.

Практика показывает, что при изготовлении первоклассных для видимых лучей больших поверхностей мы находимся у предела возможного. Во-первых, материал для оптического зеркала, например стекло, не неизменен во времени, и, как бы хорошо практически мы ни отожгли стекла, в нем все же останутся некоторые натяжения, деформирующие с течением времени изготовленную поверхность. Во-вторых, плоская поверхность сохраняет свою форму лишь при строго постоянной температуре, тогда как всякое изменение температуры влечет за собой соответствующую деформацию поверхности, преимущественно на краю зеркала (эффект края), так как, к сожалению, коэффициент расширения материала для зеркала не равен нулю, и его теплопроводность не бесконечно велика. В третьих, поверхности зеркал деформируются в силу гнуптия и сплющивания от собственного веса, и предварительные расчеты в этом направлении показали весьма неблагоприятную картину в смысле предельного диа-

метра для первоклассных зеркал. Наконец, в-четвертых, искусство человека не безгранично велико, и на сегодняшний день при существующей методике обработки больших оптических поверхностей вряд ли можно говорить о точностях поверхностей больших $0,000025$ мм, доступных притом весьма ограниченному числу мастеров.

Чем больше размеры изготавливаемой плоской поверхности, тем непомерно выше технические трудности получения первоклассной формы, так как абсолютная величина допуска не зависит от диаметра зеркала.

Постараемся на двух примерах иллюстрировать величину допуска, с которым оптик полирует первоклассную поверхность:

1) диаметр человеческого волоса ($0,08$ мм) во столько же раз больше $1/20$ длины волны зеленого луча, во сколько раз он тоньше телеграфного столба;

2) если к поверхности вполне спокойной жидкости приложить идеально выполненную линейку длиной в 1 м, то она, коснувшись поверхности жидкости центром, будет на краях отстоять от жидкости на величину нашего допуска, так как горизонтальная поверхность жидкости имеет кривизну земного шара ($R \cong 6,10^9$ мм).

Вот порядок точностей, с которыми мы должны изготавливать оптические поверхности. С еще большей точностью мы должны научиться их исследовать.

Не претендуя на полноту изложения, я хочу поделиться некоторыми соображениями теоретического и практического характера, полезными на мой взгляд не только оптику, но и лабораторному работнику и точному механику.

Снижая чувствительность оптических методов исследования, — а это всегда в нашей власти, — мы можем использовать многие выводы для менее точных работ и их контроля, например в зеркальном производстве, в шлифовочных цехах металлообрабатывающих заводов, в производстве стекла для фотопластинок и т. д.

Такие упрощенные видоизменения методов оптического исследования будут рассмотрены в конце настоящей работы применительно к отдельным техническим задачам.

2. ДВА ТИПА ОПТИЧЕСКИХ ПЛОСКОСТЕЙ ПЛОСКОСТИ ТИПА А

В отношении допустимых ошибок не безразличным оказывается направление между плоскостью и падающим на нее световым пучком.

В оптических приборах мы встречаемся с плоскостями, расположенными перпендикулярно к оси падающего пучка. Такие плоскости мы отнесем к плоскостям типа А.

Плоское зеркало автоколлимационной установки, плоское зеркало кольцевого рефлектора, поверхности плоскопараллельных

защитных стекол или светофильтров в приборах с небольшим полем зрения, преломляющие грани большинства призм полного внутреннего отражения, — все это будут плоскости типа А.

Но в значительном количестве оптических приборов мы встречаемся также и с плоскостями, наклоненными на большие углы к оси падающего пучка. Такие наклонно расположенные к пучку плоскости мы назовем плоскостями типа В.

Целлофановые зеркала, диагональные зеркала астрономического рефлектора, отражающие грани призм полного внутреннего отражения, зеркальные концевые отражатели дальнометров — все это будут плоскости типа В.

Плоскопараллельный фильтр, установленный перед широкоугольным объективом, является совокупностью плоскостей типа А лишь для осевых пучков, тогда как для пучков наклонных, его приходится рассматривать, как совокупность плоскостей типа В. Ниже мы увидим, что допуски на зональные ошибки строже у плоскостей типа А, тогда как допуски на общую кривизну строже у плоскостей типа В; поэтому такой светофильтр, работающий одновременно и в осевых и в наклонных пучках, должен быть выполнен с повышенной точностью, что конечно справедливо лишь в том случае, когда расположенная за светофильтром широкоугольная система первоклассна по всему полю.

Можно было бы дать выводы для общего случая плоскостей, наклоненных к оси пучка на произвольный угол φ (что мы дальше и сделаем) и рассматривать плоскости типа А как частный случай, при котором $\varphi = 0$; но я умышленно сделал такое подразделение плоскостей на два типа, во-первых потому, что оно реально существует в оптических приборах, и, во-вторых для того, чтобы начать выводы с более простого случая и тем облегчить изложение следующей главы, рассматривающей общий случай плоскостей, наклоненных к оси пучка.

Пусть на плоскую зеркальную поверхность $A-A$ (рис. 1) падает нормально плоская волна; если на плоскости имеется местная ошибка, — в нашем случае ямка BCB , — то поверхность отраженной волны деформируется против этой ямки, оставаясь плоской на остальном своем протяжении. У отраженной плоской волны $A'-A'$ появится ямка $B'C'B'$, глубина которой вдвое больше глубины ямки BCB поверхности зеркала.

Это не трудно доказать: если некоторая поверхность падающей

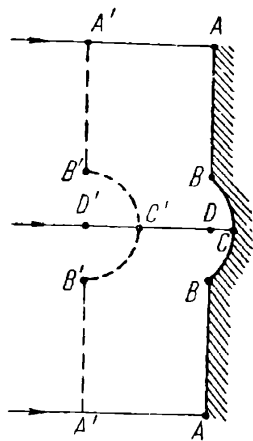


Рис. 1.

волны $A'B'D'B'A'$ заняла после отражения положение $A'B'C'B'A'$, то должно быть справедливым следующее равенство:

$$2A'A = 2B'B = 2D'D = D'C + CC', \quad (1)$$

откуда:

$$D'C = 2DC. \quad (2)$$

Таким образом местная ошибка отражающей поверхности вызывает удвоенную местную ошибку у отраженной волновой поверхности.

Совершенно тем же способом мы доказываем (рис. 2), что местная ошибка (DC) преломляющей поверхности ($ABCBA$) вызывает местную ошибку ($D'C$) у преломленной волны ($A'B'C'B'A'$), для которой справедливо следующее равенство:

$$D'C = DC \frac{n_2 - n_1}{n_2}, \quad (3)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления первой и второй среды.

Рассматривая отражение как частный случай преломления, в котором $n_1 = 1$ и $n_2 = -1$, мы из выражения (3) получаем выражение (2).

Полагая, что первая среда — воздух ($n_1 = 1$), а вторая среда — стекло кронглас ($n_2 = 1,5$), мы из выражения (3) получаем

$$D'C = \frac{DC}{3}, \text{ т. е. ошибки преломляющей}$$

кронгласовой поверхности вызывают деформации у волновой поверхности в 6 раз меньшие, нежели такие же ошибки зеркальной

(отражающей) поверхности.

Если мы от кронгласа ($n_2 = 1,5$) перейдем к тяжелому флинт-гласу ($n_2 = 1,65$), то $D'C' \approx \frac{DC}{2,5}$, а деформации волновой поверхности будут в 5 раз меньшие, нежели в случае таких же ошибок зеркальной поверхности.

Проследим дальнейшее распространение световой волны.

Пусть деформированная волна $A'B'C'B'A'$ (рис. 3) переходит из второй среды (n_2) в третью среду (n_3) и пусть поверхность раздела этих сред не имеет ошибок и является плоскостью.

В этом случае не трудно показать, что деформация $D''C''$ преломленной волновой поверхности $A''B''C''B''A''$ будет связана с деформациями $D'C'$ и DC следующим уравнением:

$$D''C'' = \frac{D'C' \cdot n_2}{n_3} - \frac{DC(n_2 - n_1)}{n_3} \quad (4)$$

Если мы рассматриваем случай плоскопараллельного стекла с показателем преломления $n = 1,5$, то в выражении (4) следует положить:

$n_1 = n_3 = 1$ и $n_2 = 1,5$, после чего: $D^*C'' = \frac{DC}{2}$ т. е. местная ошибка

каждой из преломляющих поверхностей плоскопараллельного стекла (кронгласса) вызывает местную деформацию волновой поверхности, равную половине этой ошибки.

Таким образом местные ошибки отражающей плоской поверхности в 4 раза страшнее таких же ошибок плоской преломляющей поверхности.

Волна, отраженная от плоскости типа А, будет первоклассной в том случае, когда зональные и местные ошибки плоскости, а также ее астигматизм, не будут превышать $0,05\lambda$.

Для тех же ошибок плоской преломляющей поверхности мы должны были бы дать допуск $0,2\lambda$, если бы в таких приборах, как плоскопараллельные стекла, призмы полного внутреннего отражения и др. было не две преломляющих плоскости, а одна. Но так как ошибки двух поверхностей могут иметь одинаковый знак, т. е. вызываемые ими деформации волновой поверхности могут суммироваться, то мы дадим вдвое более строгий допуск $0,1\lambda$ для каждой из преломляющих плоскостей первоклассной детали.

При повышении показателя преломления стекла детали допуск соответственно несколько ужесточается.

Первоклассные детали, собранные в сложную систему, не гарантируют еще первоклассности всей системы, раз этих деталей в ней много.

Поэтому необходим контроль системы в целом, после чего возможно исправление системы путем соответственной деформации какой-либо из плоскостей.

Но не одни только зональные ошибки и астигматизм поверхности могут деформировать сферическую волновую поверхность: общая кривизна плоской поверхности приводит к aberrациям отраженного или преломленного гомоцентрического пучка, т. е. тоже деформирует волновую поверхность, переставшую быть первоклассной при некотором достаточно большом значении общей кривизны $(\frac{1}{r})$ плоскости типа А.

Дадим вывод сферической aberrации и рассмотрим на следующем рис. 4 общий случай преломления гомоцентрического пучка, исходящего из точки S, сферической поверхностью раз-

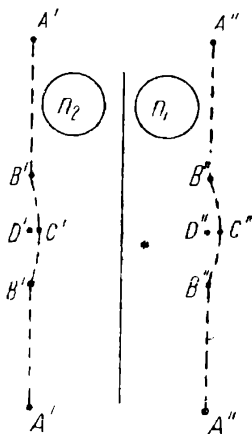


Рис. 3.

дела двух средин с показателями преломления n_1 и n_2 на высоте зоны y . Радиус кривизны поверхности раздела обозначим через r , сопряженное расстояние SC — через f_1 , а искомое сопряженное расстояние S_1C — через f_{2y} . Обозначение углов дано на рис. 4. Вывод формулы f_{2y} и продольной аберрации Δf_{2y} дадим в первом приближении.

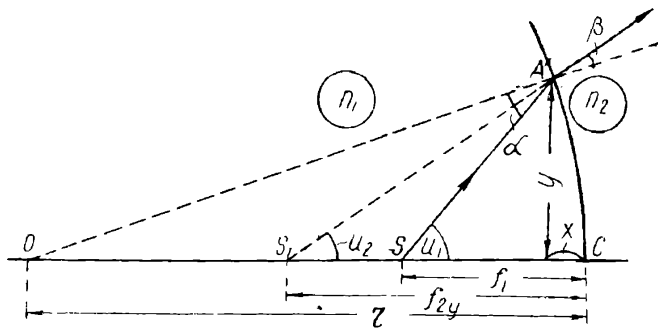


Рис. 4.

Из $\triangle OAS_1$ имеем:

$$f_{2y} = r \left(1 - \frac{\sin \beta}{\sin U_2} \right). \quad (5)$$

Далее:

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \frac{\sin \alpha \cdot n_1}{n_2} \\ \sin \gamma &= \frac{y}{r} \\ \sin U_2 &= \sin (\beta + \gamma) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Заменяя $\sin \beta$ и $\sin U_2$ (выражение 5) через $\sin \alpha$, приходим к следующему выражению для f_{2y} :

$$f_{2y} = r \left[1 - \frac{n_1}{n_2 \left(1 - \frac{y^2}{2r^2} \right) + \frac{yn_2}{r} \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \alpha} - \frac{n_1^2}{n_2^2}}} \right] \quad (7)$$

из $\triangle OAS$ имеем:

$$\sin \alpha = \sin (U_1 - \gamma), \quad (8)$$

где:

$$\sin U_1 = \frac{y}{\sqrt{(f_1 - x)^2 + y^2}} \sim \frac{y}{f_1 \sqrt{1 - \frac{y^2 (f_1 - r)}{r f_1^2}}} \quad (9)$$

откуда:

$$\frac{1}{\sin^2 \alpha} = \frac{r^2 f_1^2 \left[1 - \frac{y^2 (f_1 - r)}{r f_1^2} \right]}{y^2 (r - f_1)^2} \quad (10)$$