

КОМПЛЕКТ ПЛАНХРОМАТИЧЕСКИХ МИКРООБЪЕКТИВОВ С ПОСТОЯННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ЗРАЧКОВ

© 2011 г. Н. П. Демченко; Л. Е. Левандовская, канд. техн. наук;
С. Н. Натаровский, доктор техн. наук; Н. Б. Скобелева;
М. Н. Сокольский, доктор техн. наук

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

E-mail: snnatar@yandex.ru

Рассмотрена методика решения задачи о постоянстве положения выходных зрачков в комплекте микрообъективов относительно опорной плоскости. Приведены результаты практического использования предложенной методики.

Ключевые слова: микрообъектив, выходной зрачок, опорная плоскость.

Коды OCIS: 180.1790

Поступила в редакцию 04.05.2010

Разнообразие микроскопов, выпускаемых ОАО “ЛОМО”, требует комплектации их различными объективами. Объективы характеризуются степенью исправления аберраций, длиной тубуса микроскопа, свойствами иммерсии, конструктивным оформлением. Несмотря на значительную номенклатуру выпускаемых объективов, исчисляемых несколькими сотнями и позволяющую комплектовать микроскопы любого назначения, тем не менее постоянно возникают задачи, требующие разработки новых комплектов объективов с особыми свойствами. Одной из таких задач является создание комплектов микрообъективов с постоянным положением зрачков относительно опорной плоскости.

Особенностью всех вновь создаваемых современных микрообъективов является:

- Телецентрический ход главных лучей в пространстве предмета. Это означает, что выходной зрачок объектива располагается в задней фокальной плоскости.

- Длина тубуса современного микроскопа равна “бесконечности”, т. е. предмет (объект) совпадает с передней фокальной плоскостью. Для этого случая расстояние L_0 от предмета до выходного зрачка равно

$$L_0 = -f + f' + t, \quad (1)$$

где f , f' – переднее и заднее фокусные расстояния соответственно, t – расстояние между передней и задней главными плоскостями.

Значения фокусных расстояний объективов в каждом комплекте колеблются в интервале от 1,6 мм для объективов с увеличением $100\times$ до 64 мм для объективов с увеличением $2,5\times$. Из (1) видно, что значение L_0 будет колебаться в широких пределах. Например, для объективов серии ШПОПА (широкопольные планахроматы), для сильных объективов $L_0 \sim 26\text{--}32$ мм, для слабых – $L_0 \sim 56\text{--}60$ мм.

На практике возникает ряд задач, решение которых требует обеспечения постоянного положения выходных зрачков для всего комплекта объективов. В большинстве отечественных работ по расчету микрооптики [2–5] этот вопрос игнорируется за исключением [1], где вводятся условия масштаба, определяющие телецентрический ход главных лучей в пространстве объекта. Такой ход главных лучей подразумевается как для микрообъектива, так и для конденсора. Отметим, что выходной зрачок микрообъектива совмещен с его задней фокальной плоскостью и может совпадать с апертурной диафрагмой или с изображением апертурной диафрагмы, установленной в осветительной системе. При работе со слабыми микрообъективами фронтальная часть конденсора выводится из хода лучей и телецентрический ход главных лучей нарушается в конденсорной и объективной частях. Также следует помнить, что в микроскопах отраженного света при работе по схеме опак-иллюминатора роль конденсора выполняет микрообъектив при работе в обратном ходе

лучей. Отсутствие материальной диафрагмы в объективе приводит к нарушению телецентрического хода главных лучей как для сильных, так и для слабых объективов. При этом могут нарушаться условия коррекции полевых аберраций микрообъектива, появляется неравномерность освещения объекта, вызванная виньетированием пучков и приводящая к снижению разрешающей способности до двух раз.

Требование постоянства положения зрачков относительно опорной плоскости обусловлено рядом задач, решаемых микроскопом: работа по методу дифференциально-интерференционного или фазового контраста, выполнение ряда фотометрических задач, не допускающих виньетирования пучков, применение растровых осветителей и т. д.

В соответствии с работами [2, 3] в качестве исходной системы современного микрообъектива может быть взят триплет (рис. 1). Чаще всего, но не обязательно, $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 > 0$ и $\varphi_3 < 0$. Первый компонент φ_1 называют фронтальной частью (ее может и не быть), а систему ($\varphi_2 - \varphi_3$) – последующей.

В соответствии с [7] последующая часть строится как светосильный фотообъектив, например, апланат. В [2] предложено использовать фотообъектив, построенный по схеме обратного телеобъектива, в качестве последующей системы. Путем расчета 1-го и 2-го параксиальных лучей $\beta_1 = 0$ в прямом ходе и $\alpha_4 = 0$ в обратном ходе, находим эквивалентную оптическую силу φ_3 , фокальные отрезки S_F и S'_F и длины L и L_0 .

$$\begin{cases} \varphi_3 = \varphi_3(1 - \varphi_1 d_1) + (\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d_1)(1 - \varphi_3 d_3) \\ S'_F = [1 - \varphi_1 d_1 - d_2(\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d_1)] / \varphi_3 \\ S_F = [1 - \varphi_3 d_2 - d_1(\varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_2 \varphi_3 d_2)] / \varphi_3 \\ L_0 = -S_F + d_1 + d_2 \end{cases} \quad (2)$$

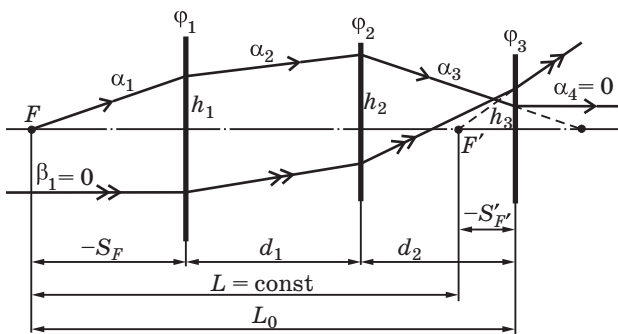


Рис. 1. Микрообъектив типа “триплет”. φ_1 – фронтальная часть; ($\varphi_2 - \varphi_3$) – последующая часть.

Увеличение φ_1 – фронтальной части определится по формуле:

$$\beta_1 = \alpha_1 / \alpha_2, \quad (3)$$

а увеличение компонента φ_2 :

$$\beta_2 = \alpha_2 / \alpha_3. \quad (4)$$

В соответствии с работами [2, 3, 6] схема объектива может быть конкретизирована (рис. 2) и получены следующие формулы (φ_1 – плоско-апланатическая линза)

$$\begin{cases} S'_\varphi = (nS - d_\pi)n \\ -S_\pi = -S'_\varphi + \delta \\ S'_\pi = S_\pi \cdot \beta_2 \end{cases} \quad (5)$$

Величины S , δ , d_π и n можно принять известными, как и β_1 , которое рекомендуется брать не более 2,5. Если ввести условие коррекции аберрации кривизны изображения:

$$S_{IV} = \varphi_1 / n_1 + \varphi_2 / n_2 + \varphi_3 / n_3, \quad (6)$$

где n_1 , n_2 , n_3 – показатели преломления, то уравнений будет достаточно для аналитического решения задачи. В [4], рассматривая методику расчета триплета, вводится также условие коррекции хроматизма положения и увеличения:

$$\begin{cases} S_{Ixp} = \varphi_1 / v_1 + h_2^2 \varphi_2 / v_2 + h_3^2 \varphi_3 / v_3 \\ S_{IIxp} = y_1 \varphi_1 / v_1 + y_2 h_2^2 \varphi_2 / v_2 + y_3 h_3^2 \varphi_3 / v_3 \end{cases}, \quad (7)$$

и далее рекомендуется отказаться от чисто математического решения задачи, приводящего к неконструктивным решениям, а задаваясь, например, значением φ_1 , φ_2 , как свободными параметрами, оптимизировать решение. Разумеется необходимо использовать результаты из [2, 3].

Используя приведенный математический аппарат, были выполнены расчеты исходных систем микрообъективов. Одновременно анализ

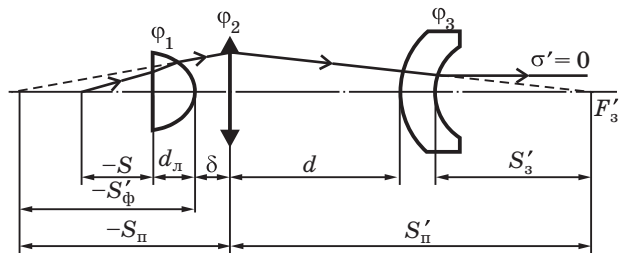


Рис. 2. Микрообъектив типа “триплет”. φ_1 – фронтальная часть; ($\varphi_2 - \varphi_3$) – последующая часть; φ_3 – мениск.

Таблица 1. Технические характеристики микрообъективов комплекта

Объектив: увеличение, апертура, тип коррекции	Рабочее расстояние, мм	Положение зрачка от опорной плоскости, мм	Хроматизм увеличения с тубусной линзой, %	Коэффициент засветки, %
5×0,14 планахромат	-7,7	-22,5	-0,13	0,37
10×0,30 планахромат	-8,2	-22,5	0,09	0,40
20×0,55 планахромат	-1,0	-22,5	0,2	0,37
40×0,85 планахромат	-0,625	-22,5	0,23	0,43
100×1,25 ахромат	-0,35	-22,5	0,17	0,45

Таблица 2. Оптические схемы объективов комплекта и характеристики качества

Оптическая схема микрообъектива	Величина изображения Y' , мм	Число Штреля Полихромат.
<p>$V = 5$ $AP = 0,14$</p>	<p>0</p> <p>2,5</p> <p>5,0</p> <p>7,5</p> <p>10,0</p>	<p>0,88</p> <p>0,75</p> <p>0,66</p> <p>0,64</p> <p>0,48</p>
<p>$V = 10$ $AP = 0,3$</p>	<p>0</p> <p>2,5</p> <p>5,0</p> <p>7,5</p> <p>10,0</p>	<p>0,85</p> <p>0,81</p> <p>0,74</p> <p>0,67</p> <p>0,48</p>
<p>$V = 20$ $AP = 0,55$</p>	<p>0</p> <p>2,5</p> <p>5,0</p> <p>7,5</p> <p>10,0</p>	<p>0,85</p> <p>0,78</p> <p>0,69</p> <p>0,64</p> <p>0,49</p>
<p>$V = 40$ $AP = 0,85$</p>	<p>0</p> <p>2,5</p> <p>5,0</p> <p>7,5</p> <p>10,0</p>	<p>0,89</p> <p>0,79</p> <p>0,7</p> <p>0,63</p> <p>0,42</p>
<p>$V = 100$ $AP = 1,25$ (MCL)</p>	<p>0</p> <p>2,5</p> <p>5,0</p> <p>7,5</p> <p>10,0</p>	<p>0,83</p> <p>0,62</p> <p>0,49</p> <p>0,39</p> <p>0,32</p>

V – линейное увеличение; AP – числовая апертура.

комплекта микрообъективов серии ШП показал, что объективы можно разбить на две группы по положению выходных зрачков относительно плоскости предмета. Группы ранее уже были обозначены.

В режиме оптимизации при работе по программе “Опал” с целью выполнения условия $L = \text{const}$ фиксировались значения f' , S'_F , S_F , S'_P и длина системы L'_S (расстояние от предмета до последней поверхности).

Результатом расчета стал комплект микрообъективов с минимально возможным коэффициентом засветки $K_{\text{засв}} \leq 0,45\%$. Коэффициент засветки контролировался в процессе расчета.

В комплект входят микрообъективы с увеличениями от $5\times$ до $100\times$, рассчитанные для работы в люминесцентном свете и выполненные из нелюминесцирующих марок стекол. Спектральный диапазон возбуждения 365–430 нм. Область ахроматизации – видимый диапазон.

Объективы имеют простую конструкцию и минимальное виньетирование при одинаковом положении выходного зрачка для всего комплекта. Расстояние между передней и задней фокальными плоскостями объективов $22,5 \pm 0,5$ мм.

Все объективы работают как без покровного стекла, так и с покровным стеклом толщиной 0,17 мм. В объективах $20\times$ и $40\times$ используется флюорит. Объективы по типу коррекции – планахроматы, кроме объектива $100\times$ – ахромата. В табл. 2 число Штреля указано в гауссовской плоскости для объективов $5\times$, $10\times$, $20\times$, $40\times$ и в плоскости наилучшей установки каждого пучка – для объектива $100\times$.

Технические характеристики объективов приведены в табл. 1, оптические схемы и характеристики качества изображения – в табл. 2.

В настоящее время на ОАО “ЛОМО” разработаны и изготовлены объективы с выровненным положением зрачков с увеличенными рабочими расстояниями (ОПХ-5БЭ, ОПХ-10БЭ, ОПХ-20БЭ, ОПХ-50БЭ, ОПХ-100БЭ), по типу коррекции – планахроматы, объективы используются в микроскопах отраженного света, в таких приборах как “МЕТАМ-РВ”, “ μ Vizo-МЕТ”, и плапахроматы (ОПА-5, ОПА-50). Этот комплект рассчитан без применения флюорита (в отличие от представленного ранее люминесцентного комплекта) и в светлопольном исполнении может использоваться в поляризационных приборах.

Разработанные по описанной методике микрообъективы будут использованы в новых микроскопах ОАО “ЛОМО” технического и медико-биологического назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.Ф. Микроскопы. Л.: Машиностроение, 1969. 512 с.
2. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 430 с.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 232 с.
4. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 639 с.
5. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 512 с.
6. Натаровский С.Н., Калинина О.Д. Микроскопы с растровыми осветительными устройствами // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 2. С. 50–54.
7. Русинов М.М. Техническая оптика. М.–Л.: Машгиз, 1961. 328 с.