

УДК 535.317.1

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ
В ОСВЕТИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ МИКРОСКОПА

Т.В. Точилина

Выполнен анализ эффективности использования светового потока в оптической системе осветительного устройства современного микроскопа. Показано, что параметры наблюдательной и осветительной ветвей микроскопа можно согласовать путем включения в оптическую систему осветительного устройства системы переменного увеличения, что позволит более чем в 10 раз повысить эффективность использования светового потока. Для этого необходим новый подход к построению оптической системы осветительного устройства. Рассмотрены варианты построения таких систем, получены аналитические соотношения, определяющие габариты входящих в них элементов.

Ключевые слова: осветительное устройство, конденсор, коллектор, объектив, световой поток, окуляр.

Введение

Избыточный световой поток, формируемый осветительным устройством современного микроскопа, не только приводит к нагреванию устройства, но и служит источником дополнительного рассеянного света, снижающего контраст изображения [1]. Линзы коллектора такого осветительного устройства имеют достаточно нетехнологичную (трудоемкую в изготовлении) форму [2, 3]. Различие в задней числовой апертуре применяемых объективов приводит к различию в несколько раз освещенности образованного ими изображения. Таким образом, анализ проблем согласования параметров различных устройств микроскопа и поиск путей их решения представляются весьма актуальными.

Анализ оптических параметров основных осветительных устройств
современного микроскопа

Световой поток, формируемый осветительным устройством, должен заполнять телесный угол, определяемый передней апертурой объектива, в пределах наблюдаемой поверхности предмета. Таким образом, оптические параметры осветительного устройства должны быть таковы, чтобы формируемый им световой поток был равен

$$d\Phi_s = d\Phi_{p\max} = \pi L_0 n_p^2 \sin^2 \sigma_{p\max} dS_{p\max}, \quad (1)$$

где $\pi \sin^2 \sigma_{p\max}$ – телесный угол, соответствующий максимальной величине апертурного угла $\sigma_{p\max}$ объектива из комплекта для конкретного микроскопа; $dS_{p\max}$ – наибольшая площадь поверхности наблюдаемого предмета. Полагая в (1) $dS_{p\max} = \pi y_{p\max}^2$, получаем

$$J_{\max} = y_{p\max} n_p \sin \sigma_{p\max}, \quad (2)$$

где J_{\max} – инвариант Лагранжа–Гельмгольца, величина которого остается неизменной для всех оптически сопряженных плоскостей оптической системы.

Предположим, что удалось создать универсальное осветительное устройство, удовлетворяющее условию (2). Тогда каждый объектив комплекта будет использовать лишь часть светового потока, формируемого коллектором, равную [4] $k_{\text{эф}} = \left(\frac{J_i}{J_{\max}} \right)^2$, где $J_i = n_{pi} y_{pi} \sin \sigma_{pi}$.

Для комплекта объективов микроскопа серии БИОЛАМ имеем [2, 3]: $J_{\max} = 1,125$, $J(\text{ОХП}-10\text{П}) = 0,18$, $J(\text{ОХ}-30) = 0,14625$, $J(\text{ОХ}-32) = 0,1125$. При этом $k_{\text{эф}}(\text{ОХП}-10\text{П}) = 0,0256$, $k_{\text{эф}}(\text{ОХ}-30) = 0,0169$, $k_{\text{эф}}(\text{ОХ}-32) = 0,01$.

В современных микроскопах для освещения предмета в проходящем свете используется система, состоящая из двух оптических элементов: коллектора, расположенного вблизи источника света, и конденсора, находящегося перед исследуемым предметом, как показано на рис. 1. При такой схеме осветительного устройства параметры коллектора должны соответствовать значению инварианта J_{\max} . Для приведенного комплекта микрообъективов $J_{\max} = 1,125$. Вполне очевидно, что чем больше поперечное увеличение изображения предмета, образованного микрообъективом, тем меньше должен быть диаметр открытой полевой диафрагмы при одном и том же конденсоре; с уменьшением отверстия полевой диафрагмы световой поток, поступающий непосредственно в осветительное устройство, существенно

уменьшается. И, тем не менее, рассеянный внутренними поверхностями корпуса осветительного устройства и закрытой частью апертурной диафрагмы конденсора избыточный свет, а также свет, отраженный преломляющими поверхностями оптической системы конденсора, образуют световое поле (засветку закрытой части полевой диафрагмы корпуса вне ее), угловая величина которого превышает угловое поле конденсора, что, в конечном счете, приводит к засветке изображения, образованного микрообъективом. Возможность наблюдения подобной засветки казалась бы маловероятной, если бы не результаты исследований, приведенных в работе [5].

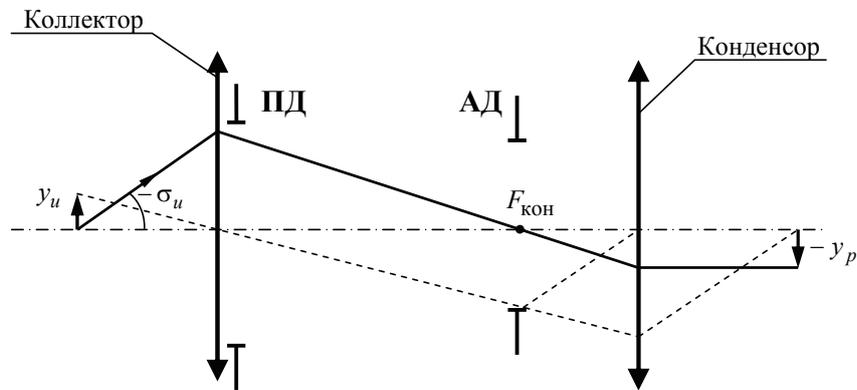


Рис. 1. Схема оптики осветительного устройства микроскопа для освещения предмета по методу Келера

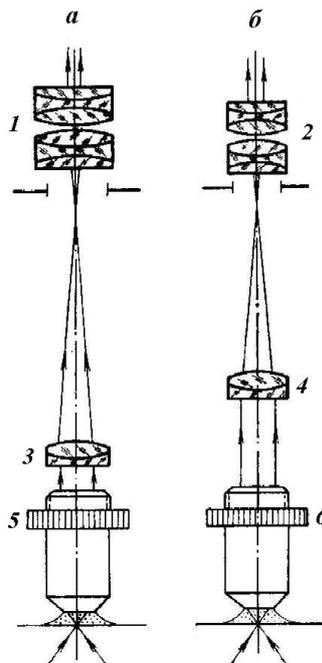


Рис. 2. Схема установки в проходящем свете: 1 – компенсационный окуляр, $\Gamma_1 = 12,5^\times$; 2 – компенсационный окуляр, $\Gamma_2 = 20^\times$; 3, 4 – дополнительные линзы, $f'_1 = 250$ и 164 мм соответственно; 5, 6 – планпохроматы, $f' = 2,5$ мм, $A = 1,25$

Исследования качества изображения, описанные в этой работе, выполнялись на установке с одним и тем же объективом-планпохроматом масляной иммерсии с фокусным расстоянием, равным 2,5 мм, и числовой апертурой $A = 1,25$, рассчитанным на длину тубуса «бесконечность», в сочетании с дополнительными ахроматическими линзами, фокусные расстояния которых $f'_1 = 250$ мм и $f'_2 = 164$ мм, как показано на рис. 2, а, б, и с широкоугольными компенсационными окулярами $\Gamma_1 = 12,5^\times$ и $\Gamma_2 = 20^\times$ соответственно. В результате проведенных исследований показано, что оптическая система с ахроматической линзой при $f' = 250$ мм и окуляром при $\Gamma = 12,5^\times$ формирует изображение более высокого качества, чем при другом варианте системы. В рассматриваемом случае $V_1 = -100^\times$, а $V_2 = -65,6^\times$. Таким образом, при первом варианте оптической системы наблюдательной ветви микроскопа площадь поверхности наблю-

даемого предмета в 2,3 раза меньше, чем при втором. Следовательно, при втором варианте системы в осветительное устройство микроскопа поступает в 2,3 раза больше света, чем при первом. За неимением другой причины следует признать, что более высокое качество изображения при наблюдении с помощью оптической системы первого варианта по сравнению с системой второго варианта определяется меньшей засветкой изображения рассеянным светом.

Композиция и синтез принципиальных схем оптических систем осветительных устройств микроскопа

Эффективность использования светового потока можно существенно повысить, если применить систему переменного увеличения. Для приведенного комплекта микрообъективов при съемной линзе конденсора достаточно получить две пары дискретных значений поперечного увеличения (в изображении источника света и полевой диафрагмы) при неизменном расстоянии между предметом и изображением. Эту задачу можно решить, применив одиночный оптический компонент, который обладает необходимыми свойствами системы переменного увеличения.

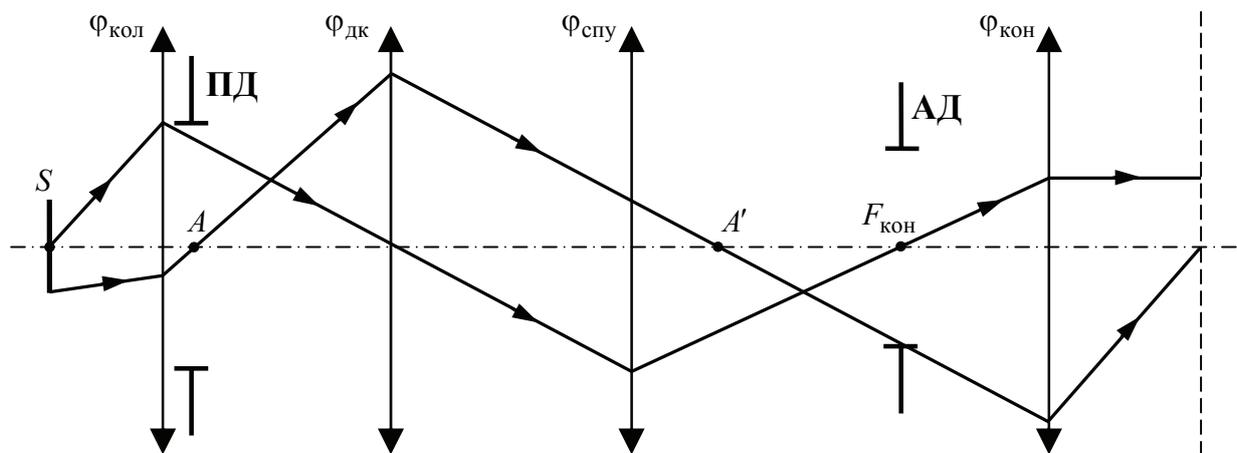


Рис. 3. Схема осветительного устройства со встроенным компонентом $\Phi_{\text{дк}}$

Чтобы в оптическую схему осветительного устройства встроить систему переменного увеличения $\Phi_{\text{спу}}$, необходим дополнительный компонент $\Phi_{\text{дк}}$, как показано на рис. 3. При этом коллектор $\Phi_{\text{кол}}$ изображает источник излучения S вблизи дополнительного компонента $\Phi_{\text{дк}}$, а компонент $\Phi_{\text{спу}}$ изображает его в плоскости апертурной диафрагмы АД (входного зрачка) конденсора $\Phi_{\text{кон}}$. Полевая диафрагма ПД, расположенная вблизи коллектора, дополнительным компонентом изображается в плоскости предмета одной из пар оптически сопряженных плоскостей компонента $\Phi_{\text{спу}}$, а соответствующая ей плоскость изображения формируется конденсором $\Phi_{\text{кон}}$ в плоскости предмета микрообъектива.

В состав исследовательских моделей микроскопа входит, как правило, ряд комплектов объективов, различающихся как характером коррекции aberrаций, так и значениями параметров. Поэтому в этом случае для построения оптической системы эффективного осветительного устройства необходима система непрерывного изменения увеличения. При сравнительно малых перепадах увеличения изображения при построении оптической системы осветительного устройства микроскопа может найти применение трехкомпонентная система переменного увеличения, например, типа «коллектив» [6, 7]. Такая система переменного увеличения обладает двумя парами оптически сопряженных точек, расстояние между которыми не изменяется при изменении увеличения изображения. Одна пара представляет собой действительное изображение действительного предмета, а другая пара – мнимое изображение мнимого предмета. Для формирования мнимого предмета в схеме осветительного устройства с системой переменного увеличения необходим дополнительный компонент (линза) $\Phi_{\text{дк}}$, как показано на рис. 4. На этом рисунке изображение S' источника света S , образованное коллектором $\Phi_{\text{кол}}$, расположено вблизи дополнительного компонента $\Phi_{\text{дк}}$. Система переменного увеличения $\Phi_{\text{спу}}$ совместно с компонентом $\Phi_{\text{дк}}$ изображает его в плоскости апертурной диафрагмы АД (входного зрачка) конденсора $\Phi_{\text{кон}}$. Полевая диафрагма ПД, расположенная вблизи коллектора, дополнительным компонентом изображается в плоскости мнимого

предмета системы $\varphi_{\text{спу}}$, образующей изображение ее в плоскости предмета конденсора $\varphi_{\text{кон}}$, плоскость изображения которого расположена в плоскости предмета микробиъективов.

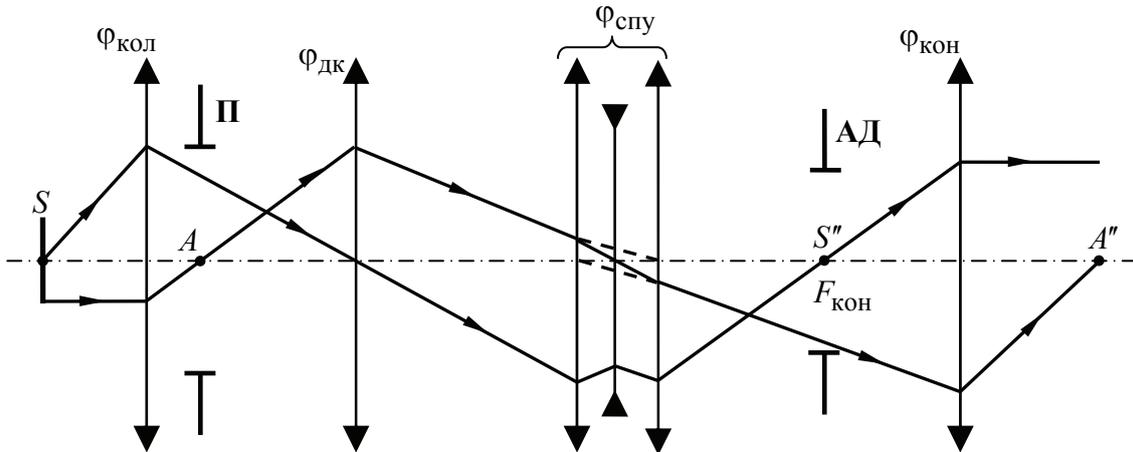


Рис. 4. Схема осветительного устройства микроскопа с оптической системой переменного увеличения для освещения по методу Келера

В трехкомпонентной системе переменного увеличения обозначим $\varphi_1 = \varphi_3 = \varphi_0$, $\varphi_2 = \varphi_k$. В начальном положении поперечное увеличение изображения, образованного трехкомпонентной системой переменного увеличения типа «коллектив», $V_n = 1^*$. При этом расстояние между компонентами $d_1 = d_2 = d_0$. Для расчета параметров системы в качестве исходного параметра удобно использовать величину поперечного увеличения V_0 изображения, образованного первым компонентом в начальном положении системы [7]. При одновременном смещении крайних компонентов вдоль оптической оси на расстояние Δ принципиальную схему рассматриваемой оптической системы можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_0 \\ d_1 &= d_0 - \Delta \\ \varphi_2 &= \varphi_k \\ d_2 &= d_0 + \Delta \\ \varphi_3 &= \varphi_0 \end{aligned}$$

Положение двух пар оптически сопряженных осевых точек, расстояние между которыми не изменяется при смещении крайних компонентов системы на предельную величину $\Delta = \Delta_0$, определяется выражениями вида [6]

$$a_{011} = \frac{d_0}{V_0}, \quad a_{012} = \frac{1 + V_0(1 - V_0)(1 + \tilde{\Delta}_0^2)}{2V_0^2 - 1} d_0, \quad \text{где } \tilde{\Delta}_0 = \frac{\Delta_0}{d_0}.$$

При этом расстояние между оптически сопряженными точками равно $L_{01} = -2 \frac{1 - V_0}{V_0} d_0$, $L_{02} = 2 \frac{2(1 + V_0) + V_0(1 + \tilde{\Delta}_0^2)}{1 - 2V_0^2} (1 - V_0) d_0$, а оптические

силы компонентов равны $\tilde{\varphi}_0 = \varphi_0 d_0 = 1 - V_0$, $\tilde{\varphi}_k = \varphi_k d_0 = -\frac{2}{1 - V_0} \frac{V_0^3}{(1 + V_0)^2 - V_0^2 \tilde{\Delta}_0^2}$. И, наконец, при

$$\tilde{a}_{01} = \tilde{a}_{011} = \frac{a_{011}}{d_0} = \frac{1}{V_0} \text{ перепад увеличения изображения определяется выражением } \mu = 1 + \frac{4V_0(1 + V_0)\tilde{\Delta}_0}{(1 + V_0 - V_0\tilde{\Delta}_0)^2}.$$

Вполне очевидно, что из-за габаритных ограничений осуществить условие $\tilde{\Delta}_0 = 1$ невозможно. Принимаем $V_0 = 0,65$. Тогда при $\mu = 4$ получаем $\tilde{\Delta}_0 = 0,8462$. При этом $\tilde{a}_{011} = 1,5385$, $\tilde{a}_{012} = -8,9703$; $\tilde{a}_{011} - \tilde{a}_{012} = 10,5088$. В рассматриваемом случае $a_{011} - a_{012} = 125$ мм. Отсюда находим, что $d_0 = 11,895$ мм. Оптические силы компонентов $\tilde{\varphi}_0 = 0,35$, $\varphi_0 = 0,02942$ мм⁻¹; $\tilde{\varphi}_k = 0,64847$, $\varphi_k = 0,05452$.

Полученные значения величин определяют оптическую систему осветительного устройства микроскопа, конструктивные параметры которой (без коллектора и без конденсора) и остаточные aberrации при двух предельных положениях крайних компонентов $\varphi_{\text{спу}}$ приведены в табл. 1–3. Обозначения величин соответствуют приведенным в [8].

Номер поверхности	Радиусы, мм	Диаметр, мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
1	20,910	2,00	ВОЗДУХ	1,000000		
2	0,000	20,41–0,28	ТК16	1,615192	7,04	0,30
3	–22,820	1,00	ВОЗДУХ	1,000000	6,71	0,00
4	22,820	0,28–20,41	Ф1	1,616878	3,41	–0,06
5	0,000	2,00	ВОЗДУХ	1,000000	3,61	0,07
6	–20,910		ТК16	1,615192	3,69	0,00
			ВОЗДУХ	1,000000	4,16	–0,10

Таблица 1. Конструктивные параметры

S_0	S_{p0}	S'_{p0}	S'_0	V_0	V_{p0}	
28,35	–96,64	117,0	–8,231	0,50011	–2,004	
$y=0$	m	$\delta s'$	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	$\eta, \%$
	–8,77	–0,0129	–0,142	0,00184	–0,126	–0,516
	–7,60	–0,0102	–0,123	0,00125	–0,0725	–0,385
	–6,20	–0,0071	–0,0998	0,000707	–0,0330	–0,255
	–4,39	–0,0037	–0,0704	0,000260	–0,0085	–0,127
y	S	S'	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	ДИС	
2,00	–96,64	115,3	0,00809	0,999	–0,0012	
y	m	$tg\sigma'$	$\delta tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	
2,00	–8,77	–0,135	–0,143	–0,0191	1,89	
	–6,20	–0,0923	–0,100	–0,0107	0,769	
	6,20	0,108	0,100	–0,0048	–0,171	
	8,77	0,150	0,142	–0,0125	–0,800	
y	M	$tg\sigma'_s$	$tg\sigma'_m$	$\delta G'$	W	$\delta g'$
2,00	–8,77	0,00798	–0,142	0,000202	0,0810	–0,0052
	–6,20	0,00804	–0,1000	–0,00042	0,0686	–0,0026

Таблица 2. Остаточные aberrации ($d = 0,28$)

S_0	S_{p0}	S'_{p0}	S'_0	V_0	V_{p0}	
8,230	–116,8	96,70	–28,35	1,9997	–0,5003	–28,35
$y=0$	m	$\delta s'$	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	$\eta, \%$
	–8,77	–0,0148	–0,0350	0,000518	–0,0084	0,126
	–7,60	–0,0112	–0,0303	0,000340	–0,0048	0,0946
	–6,20	–0,0075	–0,0248	0,000187	–0,0021	0,0630
	–4,39	–0,0038	–0,0175	0,0000668	–0,00054	0,0315
y	S	S'	$tg\sigma'_s$	$\delta g'$	ДИС	
2,00	–116,8	94,94	0,0326	4,02	0,0195	
y	m	$tg\sigma'$	$\delta tg\sigma'_s$	$\delta g'$	W	
2,00	–8,77	–0,0020	–0,0346	–0,0048	0,322	
	–6,20	0,00806	–0,0245	–0,0067	0,211	
	6,20	0,0572	0,0246	0,0224	0,444	
	8,77	0,0673	0,0347	0,0361	0,980	
y	M	$tg\sigma'_s$	$tg\sigma'_m$	$\delta G'$	W	$\delta g'$
2,00	–8,77	0,0326	–0,0349	–0,0059	0,194	0,00519
	–6,20	0,0326	–0,0247	–0,0043	0,0988	0,00259

Таблица 3. Остаточные aberrации ($d = 20,41$)

Заключение

Показана принципиальная возможность построения оптической системы осветительного устройства микроскопа на основе применения системы переменного увеличения, позволяющего более чем в 10 раз повысить эффективность использования светового потока. Естественное усложнение схемы осветительного устройства вполне компенсируется снижением требований к параметрам элементов. Представлены возможные конструкторские решения этой задачи.

Литература

1. Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. – Л.: Машиностроение. ЛО, 1989. – 221 с.

2. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Расчет и проектирование. – Л.: Машиностроение, 1976. – 432 с.
3. Скворцов Г.Е., Панов В.А., Поляков Н.И., Федин Л.А. Микроскопы. – Л.: Машиностроение, 1969. – 512 с.
4. Виноградова О.А., Зверев В.А., Точилина Т.В., Рамин Хои. Система переменного увеличения в осветительном устройстве микроскопа // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73. – № 10. – С. 24–28.
5. Андреев Л.Н., Грамматин А.П., Соколова Т.И. Влияние распределения увеличения в микроскопе между объективом и окуляром на качество изображения // ОМП. – 1979. – № 1. – С. 51–52.
6. Журова С.А., Зверев В.А. Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 10. – С. 68–86.
7. Виноградова О.А., Точилина Т.В. Эффективность осветительного устройства светового микроскопа. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2005. – Выпуск 18. – С. 248–254.
8. Вычислительная оптика. Справочник. Под общ. ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.

Точилина Татьяна Вячеславовна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tvtochilina@mail.ru