

МИКРОСКОПЫ С РАСТРОВЫМИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

© 2008 г. С. Н. Натаровский, канд. техн. наук; О. Д. Калинина

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

Рассматриваются вопросы построения и практического использования растровых осветительных устройств в отечественных микроскопах. Дается оценка реализации подобных устройств в микроскопах фирмы “Nikon”, и обсуждаются перспективы использования растровых осветительных устройств в микроскопии.

Коды OCIS: 110.0180.

Поступила в редакцию 27.06.2007.

В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом вновь появился интерес к растровым оптическим элементам и их использованию в осветительных системах микроскопов и других приборах. Появились новые схемные решения, программные продукты для расчета оптических систем, содержащих линзовые растры, появилось предложение со стороны изготовителей линзовых растров – концерна “Планар” (Беларусь) и “Limo GmbH” (Германия).

Исследования по использованию растровых осветительных устройств (РОУ) в микроскопии проводились совместно ЛИТМО, ИЗМИР АН и ОАО “ЛОМО” начиная с 1975 г. Наиболее значимые технические решения были защищены авторскими свидетельствами СССР и патентами ведущих в области микроскопии стран [1–6]. Важной особенностью таких ОУ является то, что рассеяние света происходит в требуемом телесном угле с минимальными потерями энергии, а главное, что продольное увеличение оптической системы микроскопа до окуляра в плоскостях, сопряженных с источником света, становится меньше единицы. Последнее обеспечивает фактическую реализацию метода освещения объекта по Келеру при работе с микрообъективами любого увеличения и отсутствие следов светящегося тела лампы в поле изображения при работе с микрообъективами малых (до $10\times$) увеличений [7].

В конце 80-х годов прошлого века ОАО “ЛОМО” начало выпуск серийного металлографического микроскопа МИМ-10 (рис. 1а), с середины 90-х – металлографического микроскопа Метам-ЛВ (рис. 1б), а в настоящее время начат выпуск серии микроскопов Метам-РВ.

В 1989 г. была выпущена опытная партия навесных ОУ проходящего света КСТП¹ (рис. 1в), работающих как с лазерным источником света, так и с лампой накаливания, для исследовательского биологического микроскопа МБИ-15 (рис. 1г). С целью полного устранения влияния зернистости изображе-

ния при использовании в качестве источника света лазера в КСТП предусмотрено введение колебательного движения линзового растра. Устройство для реализации колебательного движения построено по принципу камертонного генератора, действует бесшумно и не приводит к возникновению вибраций микроскопа [5].

С 2005 г. японская фирма “Nikon” приступила к серийному выпуску микроскопов “Eclipse 80i, 90i” (рис. 2) и “LV100POL/50i POL” с РОУ. Эта система освещения названа ими “fly-eye” (“глаз мухи”) и определена как революционная, обеспечивающая “идеально ровное” светораспределение.

С учетом более раннего начала выпуска серийных моделей микроскопов на ОАО “ЛОМО” по сравнению с “Nikon” предлагаемую ими систему освещения “fly-eye” революционной назвать нельзя.

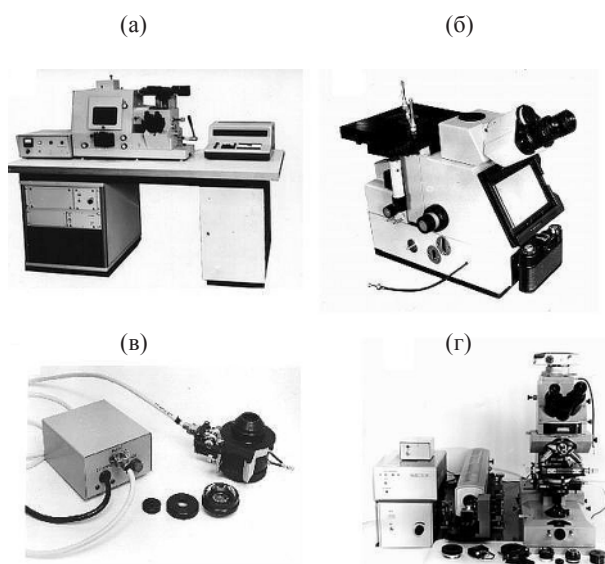


Рис. 1. Серийная продукция ОАО “ЛОМО”. а – металлографический микроскоп МИМ-10, б – металлографический микроскоп Метам-ЛВ, в – навесное ОУ проходящего света КСТП, г – исследовательский биологический микроскоп МБИ-15.

¹ КСТП – конденсор светлого и темного полей.

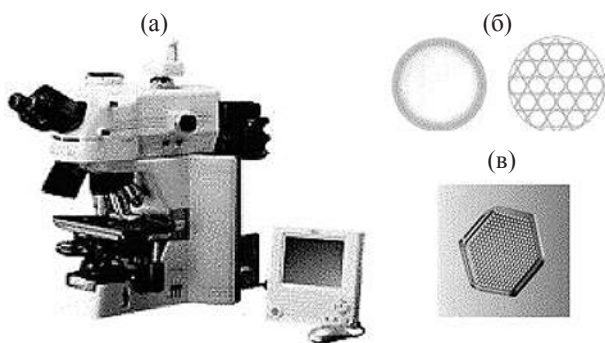


Рис. 2. Микроскоп “Eclipse 80i” (Япония). а – внешний вид микроскопа, б – вид зрчка микроскопа при отсутствии в осветительном устройстве линзового растра (слева) и в присутствии его (справа), в – внешний вид линзового растра микроскопа.

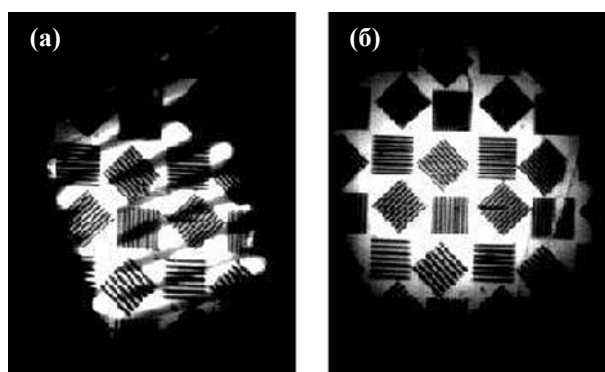


Рис. 3. Поле зрения микроскопа Метам-ЛВ. а – при отсутствии в ОУ растра, б – в присутствии в ОУ растра.

Следует также указать на патенты другой японской фирмы – “Olympus” [8], в которых заявлены РОУ для организации темнопольного освещения микрообъекта.

Отметим, что “идеально ровного” светораспределения в РОУ с одним растром при работе с протяженным источником света можно добиться только в центральной зоне освещаемой площадки, которая выделяется, как это было реализовано в микроскопе Метам-ЛВ, с помощью промежуточной полевой диафрагмы, а также полевой диафрагмой окуляра, либо необходимо использовать сотовый конденсор из двух растров или монолитный двухрастровый блок, выпускаемый концерном “Планар” (Беларусь) [7, 9].

Сказанное иллюстрируется изображениями поля зрения микроскопа при отсутствии в ходе лучей растра (рис. 3а) и при его наличии (рис. 3б) в ОУ, построенном по схеме, представленной на рис. 4а [10].

Введение в ОУ плоскости промежуточного изображения источника, где должна располагаться полевая диафрагма, может быть реализовано по схемам рис. 4б, 4в, работа которых понятна из приведенного хода лучей, а также описана в [7, 9, 11, 12]. Первая схема (рис. 4а) полезна при использовании в простых моделях микроскопов. Введение полевой диафрагмы в двух других схемах полезно и с точки зрения борьбы с рассеянным светом. Отметим, что в микроскопе Метам-ЛВ с помощью РОУ реализовано как светлопольное, так и темнопольное освещение объекта по методу Келера, исследования объекта проводятся в светлом и темном полях, по методу ДИК² и в поляризованном свете.

С помощью представленных РОУ реально обеспечить высокую равномерность освещения объек-

² ДИК – дифференциальный интерференционный контраст.

та. Для построения теоретической кривой светораспределения в плоскости освещаемого объекта примем для простоты оптическую систему РОУ, лишенную aberrаций по всему освещаемому полю. Светораспределение на поверхности объекта при отсутствии влияния aberrаций, виньетирования и без учета возможных интерференционных эффектов представлено на рис. 5а. На участке *bc* светораспределение будет равномерным. Этот участок соответствует случаю, когда из каждой точки светящегося тела (СТ) источника света и каждого линзового элемента растра (ЛЭР) в каждую точку освещаемого поля приходит световой луч. На участках *ab* и *cd* это условие не выполняется и наблюдается более или менее крутой спад освещенности. Размер *ad* участка определится по формуле $2x = 2f'_k \operatorname{tg} \sigma'_p + l\beta$, а размер участка *bc* по формуле $2x_0 = 2f'_k \operatorname{tg} \sigma'_p - l\beta$, где *l* – размер светящегося тела источника света. Значение увеличения β для каждой из схем в порядке их следования на рис. 4 будет вычисляться по формулам

$$\beta = -f'_k / f'_{\text{кол}},$$

$$\beta = -\beta_{\text{кол}} (f'_k / f'_1),$$

$$\beta = (f'_1 f'_k) / (f'_2 f'_{\text{кол}}),$$

где $f'_{\text{кол}}$ и $\beta_{\text{кол}}$ – фокусное расстояние и линейное увеличение коллектора, f'_1 и f'_2 – фокусные расстояния компонентов φ_1 и φ_2 .

Желательно работать на участке *bc* освещаемого поля, устраняя с помощью материальной полевой диафрагмы периферийную часть – участки *ab* и *cd*. Это связано с потерями световой энергии при экранировании, для уменьшения которых нужно обеспечить условия для крутого спада освещенности ($\alpha \leq 90^\circ$) на этих участках кривой светораспределения, т. е. минимизировать разность $x - x_0$. Мож-

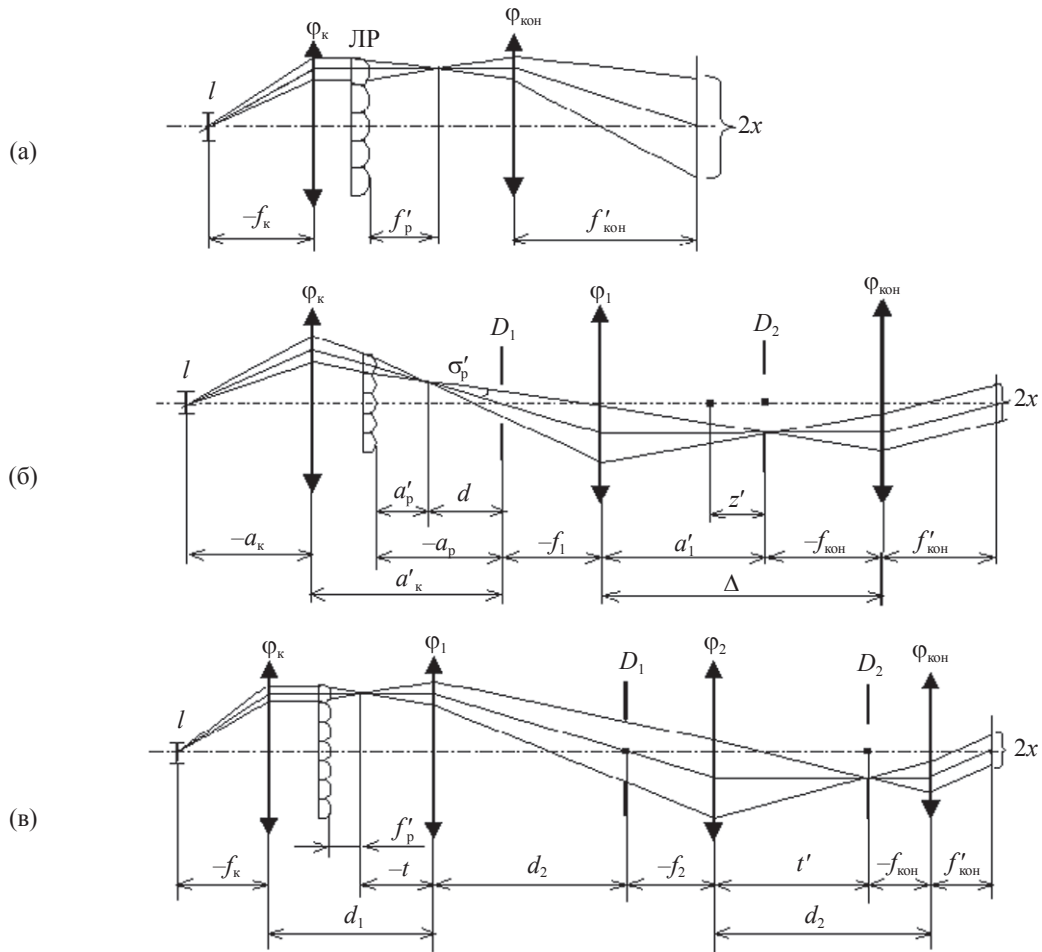


Рис. 4. Варианты оптической схемы осветительного устройства. l – источник света, φ_k – коллектор, ЛР – линзовый растр, $\varphi_{кон}$ – конденсор, D_1 – полевая диафрагма, φ_1, φ_2 – оптические компоненты, D_2 – апертурная диафрагма.

но показать, что эти потери определяются через коэффициент $K = S_{ш}/S$, где $S_{ш}$ – заштрихованная площадь на рис. 5а, S – площадь всей трапеции. С учетом введенных обозначений получим

$$K = 1 - (D - 2x)^2 / (4f_1' \text{tg} \sigma_p' \beta).$$

Для минимизации разницы между величинами x и x_0 требуется выполнение неравенств (неравенство должно быть сильным)

$$l\beta < 2f_k' \text{tg} \sigma_p' \quad \text{или} \quad l\beta > 2f_k' \text{tg} \sigma_p'.$$

При малых значениях линейного увеличения β возможно появление интерференционных эффектов на поверхности освещаемого объекта. Для их устранения необходимо выполнить неравенство $l'' > (\lambda f_k'')/2x$, где l'' – размер мультиплицированного изображения СТ лампы в плоскости апертурной диафрагмы конденсора, который определится по формулам для трех схем в порядке их следования:

$$l'' = l(f_p'/f_k'),$$

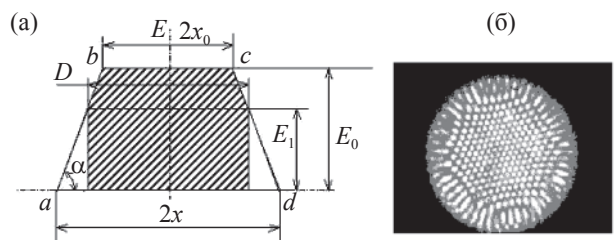


Рис. 5. Светораспределение на поверхности объекта – а, трансформация изображения упаковочной сетки ЛР в плоскости зрачка – б. (Пояснения см. в тексте.)

$$l'' = l\beta_k \beta_1 \beta_p,$$

$$l'' = l(f_p' f_2') / (f_k' f_1'),$$

где β_1 – линейное увеличение компонента φ_1 (схема по рис. 4б). Отметим, что отношение $l\beta / (2f_k' \text{tg} \sigma_p')$ определяет коэффициент некогерентности Д.С. Рождественского “с”, входящий в состав аргумента комплексной функции степени когерентности μ [13–15].

Мы здесь рассматривали “плоский” (двухмерный) вариант, в котором результат, касающийся использования световой энергии, оказывается незначительно завышенным, как и в случаях виньетирования по диаметру и площади зрачка.

Следует иметь в виду, что при использовании РОУ может иметь место неполное ($l'' < X$, где X – шаг линзового растра или его изображения), полное ($l'' = X$) заполнение зрачков конденсора и микробиоъектива или их перезаполнение ($l'' > X$) мультиплицированным изображением СТ источника света. На рис. 5а показан случай неполного заполнения зрачков. Кроме того, при хорошей коррекции сферической аберрации согласно Э. Аббе будет иметь место трансформация изображения упаковочной сетки линзового растра – прямые вырождаются в гиперболы (рис. 5б).

Осветительные устройства (ОУ) для металлографических микроскопов строились по схеме опак-иллюминатора, в качестве эпизеркал использовались параболические и конические зеркала, причем последние использовались в комбинации с тороидальной линзой. В ОУ КСТП (рис. 6) тороидальная линза 7 и коническое эпизеркало выполнены в виде монолита 11. Линзовый растр 6 имеет возможность совершать колебательное движение, что, с точки зрения устранения влияния спеклов, эффективно при работе с лазерным источником света. Простое введение линзового растра (ЛР) в лазерный освещающий

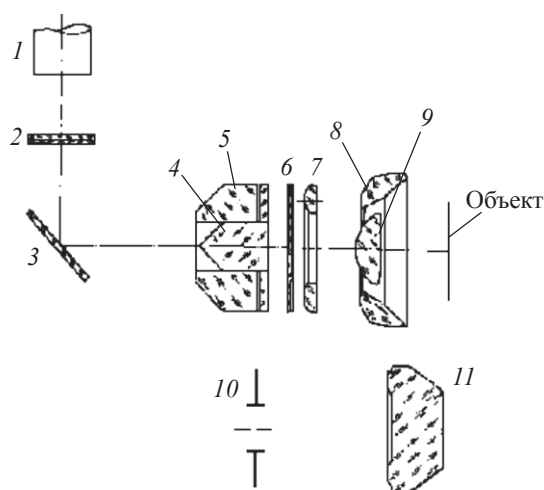


Рис. 6. Оптическая схема ОУ КСТП. 1 – лазер, 2 – поляризатор, 3 – зеркало, 4, 5 – пара коаксиальных отражательных конусов; 6 – линзовый растр, 7 – тороидальная линза, 8, 9 – серийный конденсор ОИ-10; 10 – диафрагма светлого поля, 11 – монолитный иммерсионный конденсор.

пучок снижает действие спеклов, устраняет влияние дифракционных эффектов на царапинах и пыли на оптических поверхностях (рис. 7), а придание ему колебательного движения в плоскости, перпендикулярной оптической оси, практически полностью устраняет зернистость изображения (рис. 7г).

В состав КСТП входят также темнопольный кардиоидконденсор 8, а в качестве светлопольных конденсоров используются простая линза 9, входящая, как и кардиоидконденсор 8, в состав серийного конденсора ОИ-10, и высокоапертурный серийный конденсор КОИ-3 (на схеме не показан).

Роль рассеивателя в осветительной части микроскопа часто недооценивается разработчиками, тогда как разумное его использование позволяет просто и эффективно решать задачи освещения, особенно тогда, когда, например, для реализации освещения по Келеру требуется большое увеличение коллектора, что часто имеет место в инвертированных микроскопах. Рассмотрим это на примере инвертированного микроскопа, когда необходимо осветить объект с апертурой освещения 0,5 и передним рабочим отрезком 50 мм. При использовании источника света с размером светящегося тела 1,9×1,9 мм размер апертурной диафрагмы (диаметр) составит 50 мм, а увеличение коллектора β определится из отношения 50/1,9 и составит $25\times$, что приведет к многолинзовой конструкции осветительной части. Если заменить источник света на источник с

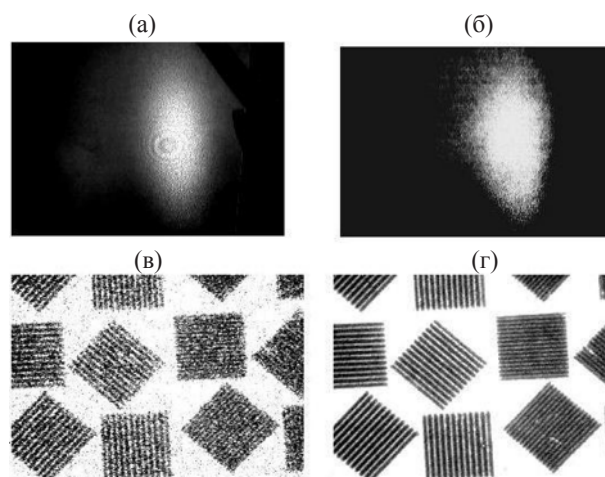


Рис. 7. Влияние введения ЛР в лазерный освещающий пучок. Сечение пучка лазерного диода при отсутствии (а) и в присутствии ЛР (б). Изображение поля зрения в микроскопе при освещении объекта лазерным пучком в присутствии в нем неподвижного ЛР (в) и ЛР, совершающего колебательное движение (г).

СТ 3×3 мм, то и здесь увеличение коллекторной части составит 17^х, что также много. Обычно разработчик в таком случае уменьшает апертуру освещения, снижая увеличение коллектора, например, до 12^х. Введение рассеивателя любого типа приводит к тому, что при расчетах становится необходимым за СТ источника света принимать светящуюся поверхность рассеивателя, размер которой при расположении рассеивателя в плоскости зрачка конденсора будет в β раз больше реального размера СТ источника света. Тогда необходимость в многолинзовой конструкции отпадает и задача может быть решена в полном объеме. Кроме того, введение рассеивателя позволяет снизить требования к оптическим элементам, расположенным до него, и, следовательно, снижает сложность конструкции узлов, в которые эти элементы входят.

Таким образом, подводя итог, можно отметить эффективность использования в микроскопии растровых осветительных устройств, позволяющих как повысить качественные характеристики освещения микрообъектов, так и повлиять на конструкцию отдельных узлов осветителей микроскопа в сторону их упрощения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хваловский В.В., Натаровский С.Н., Наливайко В.И. Осветительное устройство // А. с. СССР. № 572868. Бюл. изобр. 1977. № 34.
2. Хваловский В.В., Натаровский С.Н., Наливайко В.И. Осветительное устройство // А. с. СССР № 593276. Бюл. изобр. 1978. № 6.
3. Хваловский В.В., Наливайко В.И., Натаровский С.Н. Способ создания протяженного источника когерентного света // Изв. вузов. Приборостроение. 1977. Т. 20. № 9. С. 108–112.
4. Хваловский В.В., Натаровский С.Н., Наливайко В.И., Воронцов В.Л. Устройство для когерентного освещения объектов // Патент Франции № 7606871. 1978; Патент США № 4109304. 1978; Патент Великобритании № 1546513. 1979; Патент Австрии № 354136. 1979; Патент ФРГ № 2608176. 1981; Патент Нидерландов № 169369. 1982.
5. Абашина Г.В., Кучин А.А., Натаровский С.Н., Наливайко В.И. Осветительное устройство // А. с. СССР № 1527611. Бюл. изобр. 1989. № 45.
6. Горбачева Г.П., Гунченкова Н.М., Жидкова Н.А., Задолин Е.Ю., Мамаев А.И., Маслова Г.И., Немкова О.Н., Рагузин Р.М., Фролов Д.Н., Фрээ А.И., Федоров О.В., Шибалова И.Д. Опыт разработки микроскопов единой системы (“рабочих” и “студенческих”) // Оптический журнал. 1992. № 10. С. 42–47.
7. Варламова Л.Л., Зарубина И.Л., Калинина О.Д., Кучин А.А., Макарова И.И., Наливайко В.И., Натаровский С.Н., Немкова О.Н. Устранение изображения светящегося тела лампы из поля зрения микроскопа // ОМП. 1987. № 1. С. 42–45.
8. Illuminating Device for Mikroskopes // US Patent № 4.475.796. 1989.
9. Жидкова Н.А., Калинина О.Д., Кучин А.А., Натаровский С.Н., Немкова О.М., Скобелева Н.Б. Использование линзовых растров в осветителях микроскопов отраженного света // ОМП. 1988. № 9. С. 23–24.
10. Калинина О.Д., Кучин А.А., Натаровский С.Н. и др. Осветительное устройство // А. с. СССР № 1118948. Бюл. изобр. 1984. № 38.
11. Калинина О.Д., Селезнева Т.Ф., Натаровский С.Н. Растровые осветительные устройства для простейших моделей биологических микроскопов // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 9. С. 56–59.
12. Калинина О.Д., Натаровский С.Н. Линейное увеличение центрированной части оптической системы растрового осветителя // ОМП. 1990. № 3. С. 37–40.
13. Рождественский Д.С. Избранные труды. М.–Л.: Наука, 1964. 490 с.
14. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1966. 855 с.
15. Златина С.В., Калинина О.Д., Козлова И.П., Натаровский С.Н., Немкова О.Н., Селезнева Т.Ф., Скобелева Н.Б. Растровые осветительные устройства для микроскопа // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 11. С. 55–59.