

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОДИОДОВ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ МИКРОСКОПОВ

© 2005 г. М. А. Волкова*; С. В. Златина*; Л. М. Коган**; С. Н. Натаровский*; О. Н. Немкова*;
Б. П. Папченко***; Т. Ф. Селезнева*; Н. Б. Скобелева*; Д. Н. Фролов*

* ОАО "ЛОМО", Санкт-Петербург

** НПЦ оптико-электронных приборов "ОПТЭЛ", Москва

*** ООО "ПРОМСЕРВИС", Санкт-Петербург

Рассматриваются вопросы использования одиночных светодиодов белого свечения в качестве источника света в осветительных устройствах микроскопов для реализации освещения по методу Келера и критическому методу.

Коды OCIS: 180.0180, 230.3670.

Поступила в редакцию 17.09.2004.

В современных моделях микроскопов используются практически все известные виды источников света: лампы накаливания, люминесцентные лампы, дуговые лампы (ксеноновые и ртутные), а в лазерных интерференционных и сканирующих микроскопах – лазеры (в том числе полупроводниковые лазерные диоды). К полупроводниковым источникам света относятся и светодиоды (СД), которые в настоящее время находят широкое применение в системах отображения информации различного рода – для электронных табло, экранов высокой яркости уличного применения, в системах подсветки архитектурных объектов, светофорах, автомобильных фарах и пр. Это применение связано с высокой яркостью СД – более 10^7 нт, объясняется их высокой светоотдачей $V = 10–50$ лм/Вт [1]. Известно, что наиболее часто используемые в микроскопии галогенные лампы, например КГМ12–100, имеют $V = 29$ лм/Вт, лампы типа ДРШ имеют $V = 60–70$ лм/Вт. СД белого света, представленные на рынке, имеют $V = 25$ лм/Вт и выше [2], а их срок службы доходит до 50 000 ч, что делает перспективным их использование в микроскопах. Одним из первых примеров использования СД в микроскопах является патент фирмы "Olimpus" [3], где использует-

ся не одиночный СД, а матрица, которая устанавливается в плоскости, оптически сопряженной с плоскостью апертурной диафрагмы конденсора. Малая инерционность СД ($t \approx 10–30$ нс) позволяет в режиме реального времени менять форму апертурной диафрагмы, практически мгновенно переходить от светлопольного к темнопольному, косому и др. освещению.

Другим важным свойством СД белого свечения, помимо того что спектр их излучения сплошной, является их высокая цветовая температура. Напомним, что для глаза существует понятие яркостной чувствительности и ее максимум приходится на зеленую область спектра. Также для глаза существует понятие контрастной чувствительности, максимум которой приходится уже на синюю область спектра, т. е. мелкая структура будет лучше видна при освещении излучением с преобладанием коротковолновой спектральной составляющей [4]. Это имеет место для СД белого свечения, полученного возбуждением свечения люминофора с помощью излучения СД синего свечения ($\lambda = 455–460$ нм).

На рис. 1 приведены кривые типичного спектра излучения СД белого свечения и СД красного, зеленого и синего свечения [5]. Эти данные говорят о

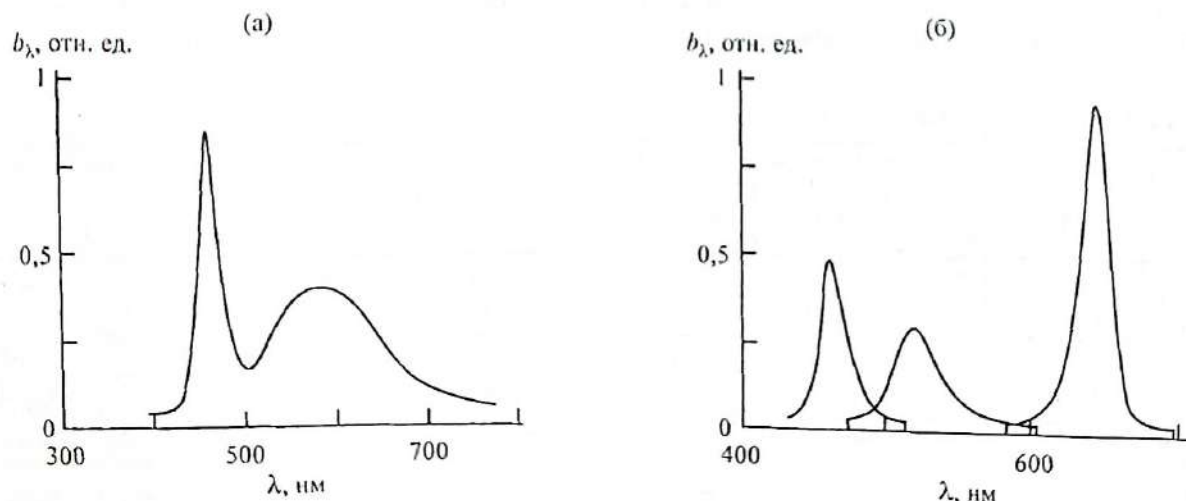


Рис. 1. Спектры излучения СД белого (а) и цветного (б) свечения.

Таблица 1. Характеристики источников света

Тип источника	Цветовые координаты		Температура, К
	x	y	
A	0,448	0,407	2856
B	0,348	0,352	4870
C	0,310	0,316	6770
D	0,313	0,329	6500

возможности реализации белого свечения за счет использования нескольких СД цветного свечения, перекрывая тем самым большую площадь цветового треугольника, координаты которого x и y определяют их близость к чистым спектральным цветам. По данным [1] цветовые координаты белого СД: $x = 0,29-0,36$, $y = 0,27-0,34$. При этом следует отметить, что при $T = 6100$ К для ксеноновой лампы $x = 0,33$, $y = 0,33$, для ртутной лампы $x = 0,307$, $y = 0,383$. Укажем, что в качестве эталона белого цвета приняты источники света А, В, С и D, для которых известны координаты x , y и цветовая температура T (табл. 1).

Источник А определяется лампой накаливания с вольфрамовой нитью (100 Вт), источники В и С получают от той же лампы с помощью фильтров (ПС5, ПС14 и СЗС17) [6] и имитируют прямое солнечное освещение и рассеянный дневной свет. Источник D не стандартизован и определяет усредненное действие дневного света [2].

Следует отметить, что в настоящее время есть СД, для которых "горб" в районе $\lambda = 600$ нм становится выше "пика" в районе $\lambda = 470$ нм. В табл. 2 приведены типичные характеристики отечественных СД [7]: У-337Бл, У-334Бл, У-164Бл – СД белого свечения, У-98Бф – СД красного свечения ($\lambda = 644$ нм), У-164И – СД зеленого свечения ($\lambda = 526$ нм), У-164С – СД синего свечения ($\lambda = 460$ нм). Нами были сняты спектральные характеристики и вычислены координаты цвета x , y для указанных СД, причем для СД белого свечения координаты цвета вычислялись дважды: с учетом и без учета действия светофильтра ЖС-12.

Таблица 2. Основные характеристики отечественных светодиодов

Тип СД	Входные электрические параметры			Светотехнические параметры				Координаты цвета	
	I, mA	U, В, не более	P, Вт	Φ, лм	J, кд	V, лм/Вт	Угол излучения, град	x	y
У-337Бл	700	7,5	5	70	55	14	50±10	—	—
У-334Бл	350	4	1,25	20	40	16		22±5	—
У-164Бл								0,335	0,315
У-164Бл с ЖС12	30	4	0,11	3	35	25	8±2	0,376	0,374
У-98Бф	30	2,5	0,07	—	15	—	25±5	0,699	0,301
У-164И	30	4	0,11	—	10	—	4±1	0,193	0,678
У-164С	30	4	0,11	—	3	—	4±1	0,137	0,051

Приведенные результаты показывают, что СД белого свечения без фильтра имеет цветовые координаты, близкие к координатам источника типа E, для которого все три координаты равны 0,333, а спектральная характеристика излучения представляет прямую, параллельную оси абсцисс. Отсюда следует вывод, что СД белого свечения как источник света в оптическом приборе может обеспечить высокое качество цветопередачи в изображении. Достоинством СД является низкое потребление энергии, однако их световой поток мал. Вместе с тем излучаемая мощность СД является важным параметром при работе в теле-, фотоканалах.

Как и для любого источника света, для СД важны размер и форма светящегося тела (СТ). Для СД цветного свечения оно имеет форму светящегося кристалла в виде прямоугольника или квадрата и размеры 0,3–1 мм. У СД белого свечения СТ определяется формой слоя люминофора, накладываемого поверх возбуждаемого кристалла. Люминофор заполняет корпус, выполненный в виде конуса кругового сечения, размер которого может достигать до 4–5 мм.

Собственно СД может состоять только из светящегося кристалла, однако обычно кристалл дополняется оптическим элементом (колпаком), позволяющим сформировать пучок СД с требуемой апертурой (диаграммой направленности, раскрывом).

На рис. 2а приведена фотография СТ, составленного из однокристалльного СД. На изображение поверхности кристаллов накладывается изображение электродов. Съемка велась через колпак СД. Видно, что поверхность изображения СД нельзя принять равной.

На рис. 2б показана оптическая система колпака СД. В зависимости от формы колпака рабочей (преломляющей) может быть вся его поверхность или ее часть. Помимо рабочей части поверхности, у колпака может быть и нерабочая – для микроскопии это обычно боковая, имеющая форму цилиндра или конуса, с осью, совпадающей с осью колпака. Рабочая поверхность чаще всего сферическая, но сфера может быть

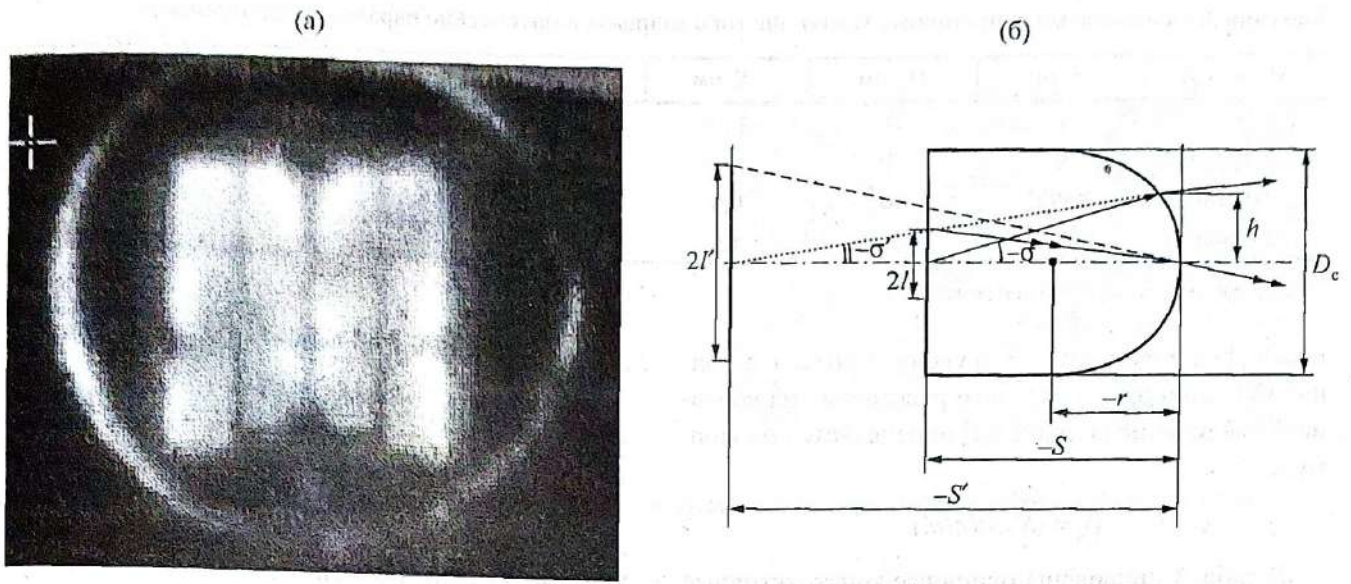


Рис. 2. Фотография светящегося тела, составленного из однокристалльного СД (а), и оптическая схема колпака СД (б).

заменена асферикой. Так, например, для СД У-98 уравнение асферической поверхности $y^2 = 3,793x - 0,6x^2$, а для СД У-164 $y^2 = 7,383x - 0,587x^2$. Эти уравнения определяют эллиптическую поверхность, и из них следует, что показатель преломления материала колпака СД $n = 1,581$. Сведения о материалах, используемых для изготовления колпака, приведены в [8, 11].

В пучке СД типа У-164, У-98, у которых имеется боковая, цилиндрическая (коническая) поверхность, являющаяся обычно нерабочей, можно выделить три зоны. Первая зона определяется лучами, которые преломляются на рабочей части поверхности и выходят из СД, формируют рабочий пучок лучей. Вторая зона определяется лучами, преломляющимися на нерабочей части и выходящими под большими углами с осью колпака СД. Будем считать, что это нерабочая часть излучения. И третья зона определяется лучами, претерпевающими полное внутреннее отражение на по-

верхности колпака. Она лежит между первыми двумя зонами и определяет часть излучения СД, которую чаще всего можно считать "потерянной".

Колпак, определяющий оптическую схему СД, может быть выполнен в виде зеркально-линзовой системы [9, 10] или в виде комбинированной поверхности. Исходя из решаемых задач, он может иметь и оригинальную конструкцию, например, его преломляющая поверхность может определяться профилем линзы Френеля.

Понятно, что СД может работать с последующей оптической системой какого-либо оптического прибора и при этом свойства собственной оптической системы СД должны быть учтены. Апертура пучка СД определяется размерами и формой кристалла и оптико-геометрическими параметрами колпака, в том числе его абберационными свойствами. Из расчета хода лучей следует, что изображение СТ кол-

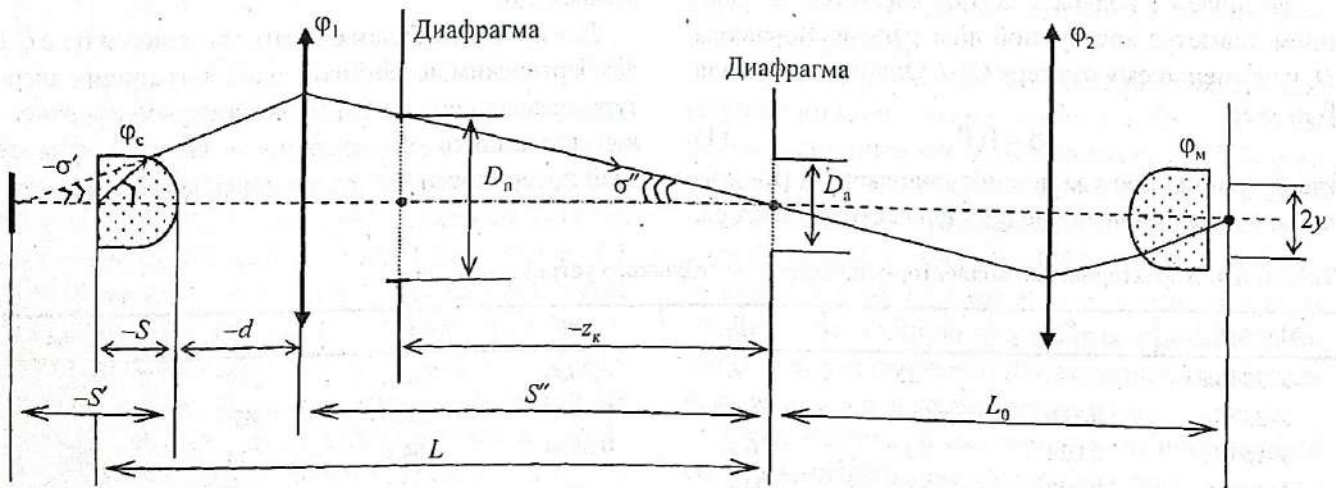


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема осветительного устройства микроскопа.

Таблица 3. Основные конструктивные характеристики колпачков и оптические параметры светодиодов

Марка СД	$-r$, мм	D_c , мм	$-S$, мм	$-S'$, мм	l , мм	β_c	l' , мм
У-334Бл	8	18	15,5	32	1×1	3,3	3,3×3,3
У-337Бл	9	18	14,7	23,2	∅4,5	2,5	∅11,3
У-164Бл	3,692*	10	9,6	80,1	0,3×0,3	13,2	4×4
У-98Бл	1,896*	5	4,6	21,3	0,3×0,3	7,3	2,2×2,2

* Поверхность колпачка эллиптическая.

пака СД является мнимым и увеличенным, т. е. колпачок СД работает с конечного расстояния на конечное. Увеличение колпачка СД определяется по формуле:

$$\beta_c = (S'/S)(n/n')$$

В табл. 3 приведены основные конструктивные характеристики колпачков СД и оптические параметры СД.

Обратим внимание на то, что СТ находится в среде с показателем преломления, отличным от единицы. Последнее обстоятельство имеет важное значение при построении осветительного устройства (ОУ) микроскопа, так как появляется возможность реализации иммерсионного коллектора. Обратимся к рис. 3, где приведена принципиальная оптическая схема ОУ микроскопа, в котором реализуется освещение по методу Келера. Через φ_c и φ_1 обозначены оптические силы колпачка СД и последующей линзовой системы коллектора, а через φ_2 и φ_m – оптические силы линзы и мениска конденсора. При работе коллектора необходимыми данными являются его линейное увеличение, задний отрезок S'' или длина L и передняя или задняя апертура. В [11, 12] рекомендуется значение $S'' \geq 200$, что позволяет уменьшить тепловое воздействие источника света на объект. При использовании СД белого свечения тепловое воздействие на объект практически исключается, поэтому значения S'' и L будут определяться из оптико-геометрических соображений.

Увеличение коллектора β определится отношением диаметра апертурной диафрагмы конденсора D_k к наименьшему размеру СТ l . Одновременно для β имеем:

$$\beta = \beta_c \beta_1, \quad (1)$$

где β_c – линейное увеличение колпачка СД, β_1 – линейное увеличение последующей части коллектора.

Таблица 4. Характеристики коллекторной части осветительного устройства (рис. 3)

Марка СД	$-\beta_c$	$-\beta$	$-\beta_1$	$\sin \sigma'$	S''	L , мм	D_n , мм
У-334Бл	0,046	25	7,6	0,8438	243,2	259	54
У-337Бл	0,180	5,6	2,24	0,3017	52,0	67	14
У-164Бл	0,023	83,3	6,3	0,6804	504,6	514	109
У-98Бл	0,049	83,3	11,4	—	242,8	247	51

Примечание: При расчете параметры СД, используемого в качестве источника света, брались из табл. 2.

В табл. 4 приведены некоторые характеристики коллекторной части ОУ по рис. 3 при использовании в них в качестве источника света СД. (Параметры СД брались из табл. 1, 2.)

При расчетах было принято $d = 0$, $D_k = 25$ мм. Для заполнения полевой диафрагмы, с одной стороны, необходимо иметь

$$D_n = 2S' \sin \sigma', \quad (2)$$

а с другой –

$$D_n = 2y/\beta_k, \quad (3)$$

где $2y$ – размер освещаемого объекта, β_k – линейное увеличение конденсора.

Значение $2y$ получается при задании поля зрения окуляра микроскопа автоматически. Например, при поле зрения окуляра 25 мм и увеличении объективной части визуального канала от $2,5\times$ до $100\times$ для $2y$ получили интервал значений от 10 до 0,25 мм. Если теперь допустить $-z_k = S''$ и фокусное расстояние конденсора f'_k принять равным 12 мм, то β_k для рассматриваемых СД легко определим по формуле:

$$\beta_k = -f'_k/S''. \quad (4)$$

Расчетные значения β_k , D_n и σ' также приведены в табл. 4. При выполнении расчетов увеличение объективной части принималось равным $10\times$.

Прежде чем прокомментируем данные табл. 4, оценим предельные значения $\sin \sigma'$ для рассматриваемых СД.

Для простоты будем считать светящееся тело СД ламбертовским источником света. Ограничим апертуру выходящего из СД пучка в случае сферической преломляющей поверхности высотой луча на этой поверхности $h \leq |r|$; в случае, когда эта поверх-

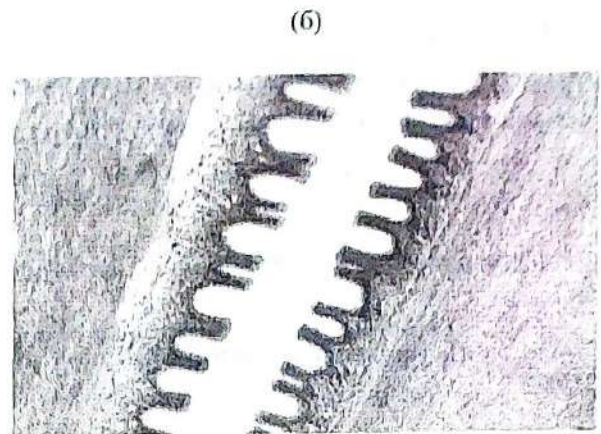
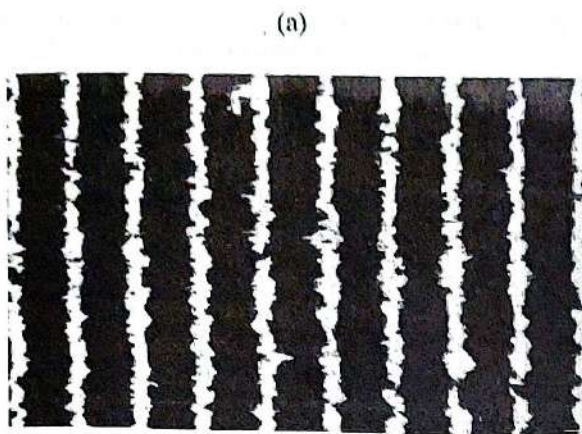


Рис. 4. Изображение штрихового препарата (а) и биологического объекта *Asterias rubens*. Объектив 10^х/0,30, интерференционный фильтр $\lambda = 532$ нм.

хность плоская, – углом полного внутреннего отражения; в случае асферической, например эллиптической, поверхности – чаще всего границей этой поверхности с технологической поверхностью. Последняя обычно коническая, и через нее также выходят световые пучки.

В случае плоской преломляющей поверхности $\sin\sigma' \leq 1/n$, а $\beta_c = 1^x$ и при $n = 1,581$ $\sin\sigma' \leq 0,6325$. Если поверхность сферическая, то целесообразно разместить СТ в ее апланатических точках.

При размещении СТ в центре сферы

$$\sigma' = \sigma \leq 90^\circ,$$

$$\beta_c = n,$$

а в случае $S = \frac{n+1}{n}r$

$$\beta_c = n^2,$$

$$\sin\sigma' \leq \frac{1}{\sqrt{1+n^2}}, \quad (5)$$

при $n = 1,581$

$$\sin\sigma' \leq 0,5346. \quad (6)$$

Полученные значения $\sin\sigma'$, кроме случая расположения СТ в центре сферической преломляющей поверхности, не обеспечивают полное заполнение полевой диафрагмы, и лишь при использовании У-337Бл, для которого в соответствии с последним случаем СТ располагается в апланатической точке, освещается все поле. Для СД У-337Бл можно достигнуть значения $D_n = 25$ мм. Отметим, что при $d > 0$ значение D_n будет больше и легко достигаются значения, равные 32–35 мм, что при $-\beta_k = 0,18$ обеспечит $2y = 5,8$ – $6,3$ мм, т. е. при нашем поле окуляра 25 мм освещаемое поле будет соответствовать увеличению объективной части 4^х.

Возвращаясь к табл. 4, отметим, что значения $D_n > 50$ мм следует считать экстремальными, для освещения больших полей следует искать либо иные решения, либо, снимая фронтальную линзу конденсора ϕ_m , увеличивать в 2–3 раза фокусное расстояние конденсора. При таком увеличении фокусного расстояния конденсора уменьшится требуемое значение $\sin\sigma'$. Например, при $f_2' = 30$ мм и использовании СД У-337Бл для освещения поля $2y = 10$ мм требуемое значение $\sin\sigma'$ при $D_n = 22,22$ мм будет равно 0,4789, удовлетворяющее неравенствам (5) и (6).

Упомянутые иные решения связаны как с переходом к критическому способу освещения, так и с введением в ход лучей рассеивателей.

При критическом способе освещения СТ проецируется на поверхность освещаемого объекта. В этом случае возможно $S'' = 0$, длина ОУ становится небольшой (до 70 мм) и все ОУ, включая СД, коллектор и конденсор, может быть конструктивно решено единым узлом, крепящимся на кронштейне конденсора. Оптическая система ОУ становится близкой к симметричной с общим линейным увеличением -1^x , что благотворно скажется на коме системы, а в итоге и на светораспределении по поверхности освещаемого объекта [13, 14].

В заключение на рис. 4 приведены изображения штрихового (а) и биологического (б) объектов. В качестве источника света использовался СД белого свечения У-337Бл, изображение фиксировалось на телекамеру VNC-743, установленную на место бинокулярной насадки микроскопа БИОЛАМ Р11. Использование СД У-337Бл обеспечивает освещенность на объекте, достаточную для работы с объективами, имеющими увеличение до 100^х включительно, как для визуального, так и телевизионного каналов.

Опыт работы со светодиодными источниками света на микроскопах различного типа подтверждает их высокую надежность, стабильность световых характеристик и удобство в эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тезисы докладов V Международной светотехнической конференции "Свет и прогресс". СПб., 2003.
2. Справочная книга по светотехнике. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. US Patent № 4852.985, 1989. Illuminating device for microscopes.
4. Претт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.
5. Волков В., Коган Л. Телевизионные системы с использованием светодиодных осветителей // Электронные компоненты. 2002. № 2.
6. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974. 333 с.
7. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов. В. 7-8(34-35). М.: 2001.
8. Скворцов Г.Е. и др. Микроскопы. Л.: Машиностроение, 1975. 639 с.
9. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 430 с.
10. Лебедев О.А., Сабинин В.Е., Солк С.В. Полимерная оптика для светоизлучающих диодов // Светотехника. 2001. № 5. С. 18-19.
11. Шепурев Э.И. Оптические свойства стеклообразных органических полимеров // ОМП. 1986. № 1. С. 51-55.
12. Сабинин В.Е., Солк С.В. Проблемы проектирования и изготовления оптики из полимерных материалов // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 61-64.
13. Слюсарев Г.Г. Расчеты оптических систем. Л.: Машиностроение, 1979. 639 с.
14. Русинов М.М. Техническая оптика. Л.: Машгиз, 1961.