

Сергей Никифоров, к.т.н. | snikiforov@list-lab.ru

Некоторые аспекты восприятия светодиодного излучения глазным аппаратом на примере приборов световой ж/д сигнализации на основе светодиодов

В статье изложен анализ физических аспектов работы фотометрического аппарата глаза человека под действием излучения от различного типа источников. Приведены результаты исследований параметров железнодорожных светофоров на основе ламп и светофильтров-линз как яркого примера создания узкополосного излучения, которое одно из первых претендует на использование квазимонохромного света от светодиодов. Отмечены положительные стороны применения светодиодов и очерчены проблемы их использования. Статья может быть полезна разработчикам устройств светотехники, инженерам-проектировщикам, производителям и разработчикам светосигнальной техники.

Совершенствование подвижной части ж/д техники определяет существенный рост скоростей движения составов и, соответственно, транспортных потоков по ж/д магистралям. Увеличение скорости движения повышает требования к средствам световой сигнализации, светофорам, где верность и скорость распознавания цвета сигнала играет определяющую роль в принятии решения о характере движения. Проведенное силами лаборатории «Л.И.С.Т.» детальное исследование фотометрических и колориметрических характеристик существующих светофоров на лампах накаливания, спроектированных с учетом прежних стандартов, и светодиодных показало существенную разницу в восприятии данных сигналов глазом человека. Метрологические возможности лаборатории, а также более чем 10-летний опыт работы с ж/д светосигнальной техникой позволили провести ряд фундаментальных исследований светосигнальной аппаратуры и получить объективную картину состояния существующих светофоров и перспективы применения светодиодов с целью существенного увеличения надежности и эффективности ж/д светотехники.

Энергетические характеристики излучения светофоров

Большинство фотометрических характеристик ж/д светофоров на основе ламп и линзовых комплектов зависят только от параметров исходных источников — ламп накаливания. Наиболее распространены лампы мощностью 15 Вт, которые при штатном напряжении питания (12 В), обладая известной эффективностью преобразования — 9–11 лм/Вт, излучают порядка 150 лм светового потока с цветовой температурой около 2400 К. Все цвета сигналов светофоров формируются оптической системой — линзовым комплектом (ЛК): светофильтром-линзой, «вырезающей» нужный участок спектра излучения лампы и определяющей цвет, и второй линзой Френеля, имеющей большую оптическую силу (рис. 1). Оптическая система светодиода представлена излучающим кристаллом и линзой. Преобразование электрической энергии в световую (излучательная рекомбинация) происходит в полупроводниковом кристалле и изначально имеет необходимые цветовые характеристики, определяющиеся материалом кристалла, поэтому при использовании светодиодов нет нужды в светофильтрах.

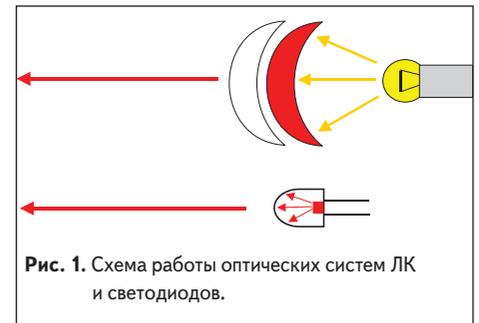


Рис. 1. Схема работы оптических систем ЛК и светодиодов.

В таблице 1 приведены энергетические характеристики светофоров на ЛК и на основе светодиодов.

Из приведенных в таблице данных видно, что всего лишь единицы процентов исходного излучения лампы используются для формирования полезного сигнала светофора. В то же время все 100% производимого светодиодом светового потока направляются на наблюдателя. Поэтому по своей эффективности в большинстве случаев один-единственный светодиод на основе кристалла размером всего 0,25×0,25 мм может (с сохранением фотометрических параметров светофора) заменить целый линзовый комплект с лампой в 15 Вт. При этом он будет потреблять в сотни раз меньше электроэнергии, что также видно из таблицы 1. Однако совершенно понятно, что никто не будет строить светофор на одном или нескольких таких светодиодах хотя бы из конструктивных соображений (хотя предложения уже разработаны и имеются, и они оправданы своими параметрами), — мы показали лишь световую эффективность полупроводниковых источников в сравнении с ламповыми.

Все указанные характеристики в части светового потока и формирования необходимого значения осевой силы света и пространственного распределения светового потока имеют лишь одну цель: создать нужную освещенность сетчатки глаза машиниста с целью верного распознавания цвета сигнала на максимально большом расстоянии. В соответствии с существующим ГОСТ 25695-91 это расстояние составляет 1000 м для прямых перегонных участков магистрали. В таблице 2 представлены данные о пороговой освещенности на разных цветах сигналов, а также нормативные, реальные и светодиодные значения осевой силы света ж/д светофоров. Пороговые

Таблица 1. Энергетические характеристики светофоров на ЛК и на основе светодиодов

Цвет	Световой поток				Энергопотребление, Вт		
	ЛК, лм	Доля излучения без фильтра, %	Доля излучения от лампы, %	1 светодиод, лм	ЛК	Светодиод	Отношение
Красный	2,7	22,9	1,9	3	15	0,08	187,5
Желтый	9,85	83,5	6,8	3,5	15	0,24	62,5
Зеленый	4,8	40,7	3,3	4,5	15	0,15	100,0
Синий	0,58	4,9	0,4	0,6	15	0,15	100,0
Лунно-белый	10,4	88,1	7,2	4	15	0,45	33,3

Таблица 2. Данные о пороговой освещенности на разных цветах сигналов, нормативные, реальные и светодиодные значения осевой силы света

Цвет	Пороговая освещенность, лк 10^{-3}	СС по ГОСТ 25695-91, кд	СС реальная, кд	СС на светодиодах, кд
Красный	1,20	2100	1330	6000
Желтый	2,49	4350	3890	15000
Зеленый	1,49	2600	2510	12000
Синий	0,09	150	252	5000
Лунно-белый	1,43	2500	4100	10000

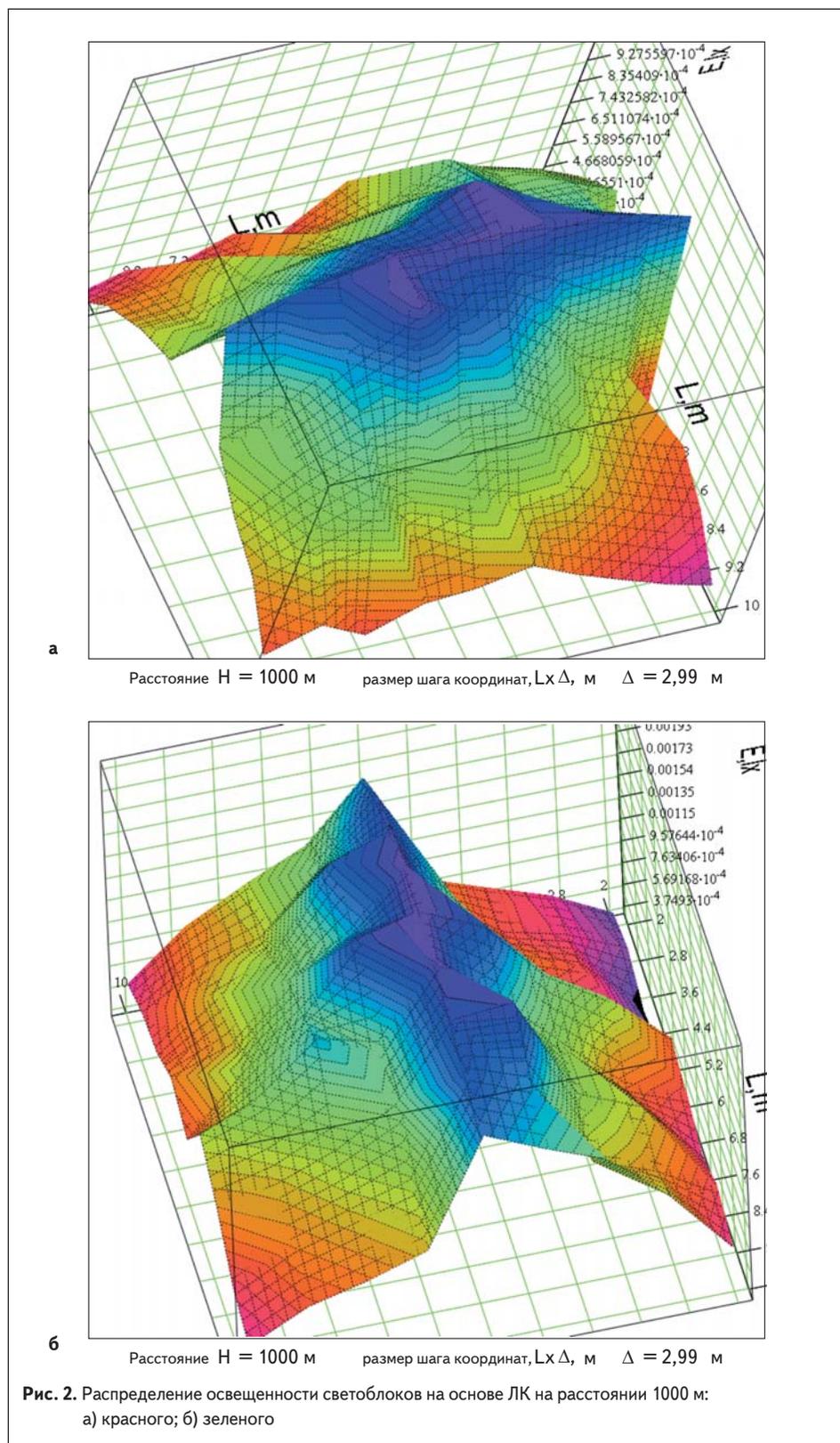


Рис. 2. Распределение освещенности светоблоков на основе ЛК на расстоянии 1000 м: а) красного; б) зеленого

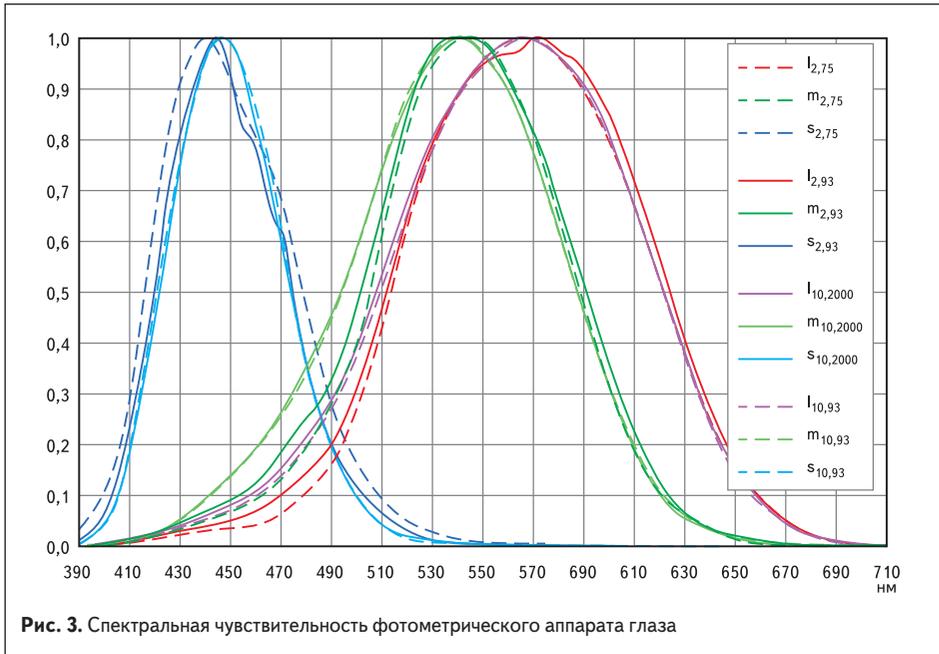
освещенности были получены исходя из условий достоверного определения машинистами цвета сигнала, сформированного светоблоком на основе ЛК-светофора на расстоянии 1000 м. Предписанные ГОСТ 25695-91 значения осевой силы света (СС) создают на таком расстоянии освещенность, приблизительно в 1,5–2 раза большую, чем пороговая. Однако самые современные исследования физики работы глаза показали, что для требуемой вероятности верного определения цвета сигнала с угловым размером, соответствующим светофорному, требуется освещенность, в несколько раз превосходящая указанную пороговую и одинаковая для всех цветов. Такой вывод обусловлен большим разбросом параметров светочувствительных элементов глаз и существенной разницей в объеме аккомодации глаза в зависимости от возраста машиниста (отличие в объеме аккомодации меняется почти в 10 раз при возрасте от 17 до 60 лет). Также принято во внимание и время правильного распознавания цвета, которое в нормальном режиме составляет около 1 с, а в условиях плохой видимости или ночного режима, а также при возрастных изменениях может составить до 3–4 с, что при скорости поезда около 200 км/ч сокращает дистанцию до светофора примерно на четверть, и машинист просто не успеет предпринять какие-либо действия.

Из таблицы 2 также можно заметить, что светофоры на основе светодиодов обладают значительным потенциалом для создания осевой силы света светоблока светофора, который может быть использован для формирования необходимой освещенности и на большем, чем 1000 м, расстоянии, что, безусловно, выигрышно скажется на времени принятия решения и, как следствие, на повышении безопасности движения в целом. В то же время линзовые комплекты на лампах (см. табл. 1) работают на пределе возможности и не имеют запаса по осевой силе света, тем более что световой поток этих ламп уже через 1000 часов работы уменьшается примерно на треть. Светодиоды не имеют такого недостатка, и их продолжительность работы с сохранением 95% светового потока может продолжаться до 20 000 часов.

На рис. 2 наглядно показано распределение освещенности от светофора на основе ЛК в плоскости, отстоящей от него на 1000 м.

Прецизионные измерения углового распределения силы света в большом количестве плоскостей пространства, проведенные в лаборатории «Л.И.С.Т» с помощью двухкоординатного гониофотометра с угловым разрешением поворота в $0,02^\circ$, позволили с высокой точностью воссоздать картину распределения освещенности в плоскости наблюдения машиниста и определить фотометрические условия восприятия сигнала.

Можно заметить, что пятно засветки выглядит как явно выделяющаяся по значению большей освещенности линия шириной 5–7 м и длиной 30–35 м. Это проекция нити накала лампы на расстоянии 1 км. Следует добавить, что пятно засветки от светодиодного светоблока всегда будет представлено распределением освещенности в виде концентрических колец, как правило, с максимумом в центре. Это обстоятельство создаст большую по сравнению с нитью накала



лампы площадь с пороговой освещенностью, что может существенно облегчить настройку светофора на нужную точку восприятия.

Спектральные характеристики чувствительности глазного аппарата и светофоров

Помимо энергетической характеристики (освещенности) излучения, необходимого для восприятия глазом, крайне важны его спектральные параметры, определяющие цветность сигнала. Свет, генерируемый светоблоком светофора, должен иметь такое спектральное распределение плотности энергетической яркости, которое обеспечивало бы однозначное сопоставление ему того или иного цвета. С точки зрения восприятия цвета, глазной аппарат человека имеет 3 различных типа фоточувствительных клеток – колбочек, со времен Гельмгольца определенных как синие, зеленые и красные. Все остальные оттенки получают совместным восприятием света колбочками разных типов (их относительные спектральные чувствительности приведены на рис. 3). По диаграмме на рисунке видно, что значительные площади под кривыми графиков пересекаются; в большинстве случаев восприятия это означает одновременную работу двух, а то и всех трех, хотя и в различной степени, типов колбочек. Совершенно очевидно, что наибольшая вероятность точного восприятия цветового стимула возможна лишь тогда, когда в работе участвуют лишь колбочки одного типа либо одновременная работа других минимальна. Такое положение дел возможно лишь при облучении сетчатки узкополосным источником света, плотность энергии которого сосредоточена в узком диапазоне энергий квантов или, по-другому, длин волн. Иными словами, действие такого источника получается «точечным», направленным только в узкую область спектральной чувствительности глазного аппарата, что и формирует в мозгу отклик об однозначности цвета и в зависимости от этого стимулирует на совершение определенных дальнейших действий. По рис. 3 также понятно, что наиболее проблемным цветом является желтый (доминирующая длина волны около 590 нм), при восприятии которого не удастся избежать смешанной работы различных типов колбочек, да и собственно, который и является плодом смешения основных цветов. Именно по этой причине пороговая освещенность на желтом максимальна, и, соответственно, требуемая сила света светоблока должна быть существенно больше, чем у других цветов, — при условии сохранения одинаковой вероятности верного восприятия цвета.

Переходя к узкополосности спектра энергий сигналов, обратимся к таблице 3, в которой приведены данные о спектральном составе излучения светоблоков на ЛК и светодиодах. Рис. 4 является наглядной иллюстрацией к табличным данным.

Распределение плотности энергетической яркости характеризуется полушириной спектра, и, соответственно, чем она меньше, тем уже спектр. Из таблицы видно, что ширина спектра по уровню половины интенсивности у светодиодов в 3–6 раз меньше по сравнению с ЛК. Что также подтверждается значениями

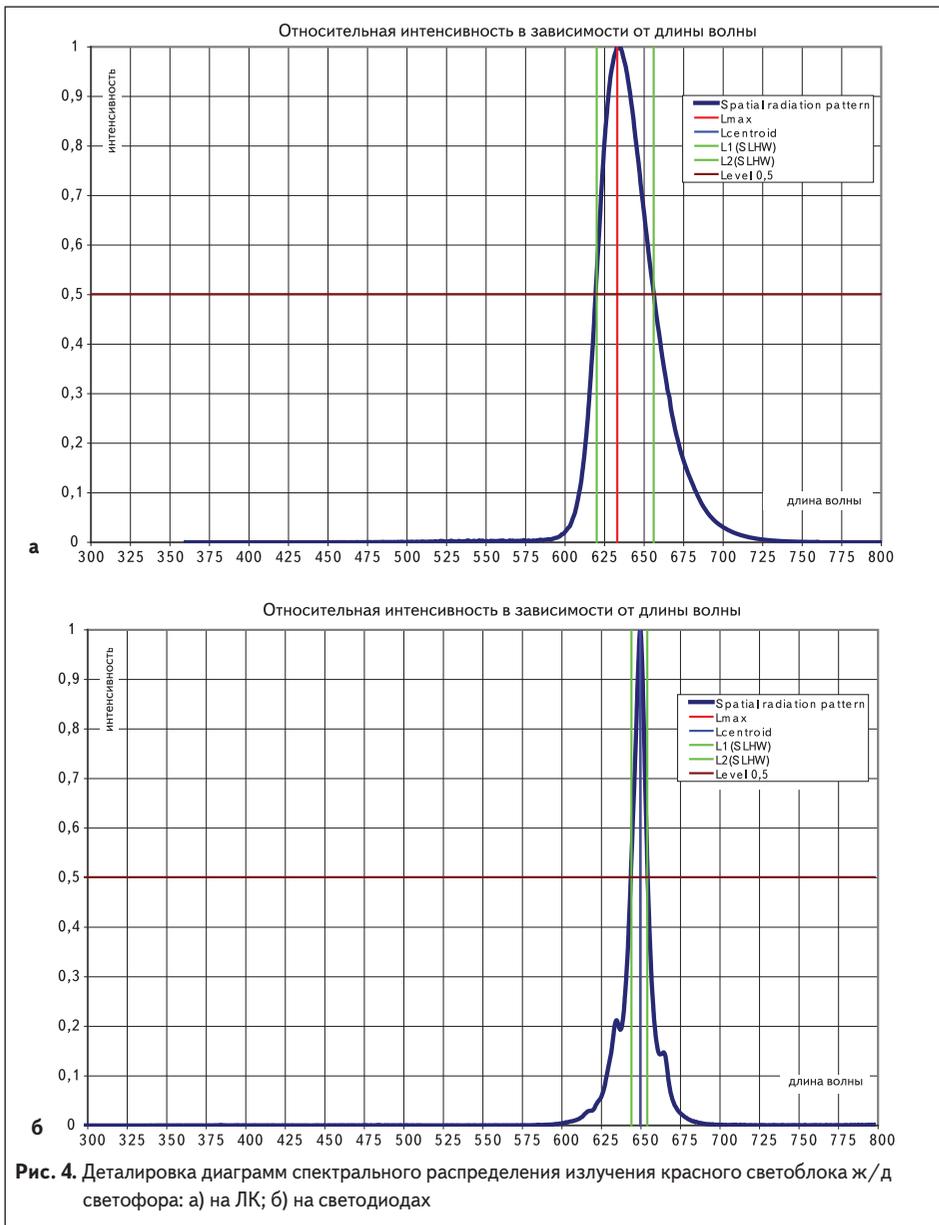


Таблица 3. Данные о спектральном составе излучения светоблоков на ЛК и светодиодах

Цвет	Полуширина относительного спектрального распределения излучения по $V(\lambda)$, нм		Интеграл абсолютного спектра излучения по $V(\lambda)$	
	ЛК	Светодиоды	ЛК	Светодиоды
Красный	36,5	10,0	5,3	2,15
Желтый	82,3	15,5	29,7	13,2
Зеленый	62,0	28,0	56,6	18,6
Синий	106,0	18,5	2,4	1,5

интегралов спектров, характеризующих не только полуширину, но и всю площадь под кривой спектрального распределения по всем уровням энергий. Как можно заметить, интеграл также в 2–3 раза меньше у светодиодного варианта светофора.

Из сказанного следует очевидный вывод: в данном случае светодиодный светофор будет существенно выигрывать по верности восприятия цвета у ЛК при прочих равных условиях. Однако полупроводниковые источники излучения значительно проигрывают в этой части характеристик при изменении температурных условий работы. Изменение доминирующей длины волны более чем на 10 нм в требуемом диапазоне температур (–60...+55 °С) может оказаться для желтого и красного сигнала неприемлемым для применения. Эта проблема в данное время решается как технически, так и законодательно: в первом случае разрабатываются средства обеспечения минимальных изменений параметров светодиодов, совершенствуются сами излучающие полупроводниковые структуры, а во втором случае — проводятся эксперименты по изменению существующих стандартов в части расширения границ цветности с учетом вышеупомянутых важных преимуществ в восприятии цвета.

Другие свойства светофоров на светодиодах и ЛК

Обобщив приведенные выше характеристики светофоров, дополним объективную картину технического состояния светосигнальных ж/д устройств на светодиодах следующими положительными факторами:

- Нарботка не менее 50 000 часов без обслуживания и значимого изменения характеристик.
- Высокая механическая прочность.
- Значительное снижение энергопотребления.
- Постоянство характеристик при различных электрических режимах работы.
- Существенное увеличение дальности и сокращение времени верного восприятия цвета сигнала.
- Значительное уменьшение времени включения сигнала светофора.

К проблемам применения светодиодов относятся:

- Стыковка с существующей системой управления режимами, например, из-за низкого энергопотребления.
- Изменение цветовых характеристик и значений силы света при изменении температуры.
- Чувствительность к воздействию наводок и импульсных помех.
- Катафотный эффект.

Подводя итог приведенным рассуждениям, можно сделать вывод о том, что применение светодиодов в светосигнальной ж/д аппаратуре имеет ряд проблем. Однако существенный совокупный качественный эффект, который непременно будет иметь место в случае применения светодиодов, оправдывает многие средства его достижения, ведь результатом станет максимальная безопасность движения поездов и сохраненная жизнь людей, имеющая наивысшую ценность. ●

Литература

1. Агафонов Д. Р., Мурашова М. А., Никифоров С. Г., Пинчук О. П., Столяревская Р. И. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светоизлучающих диодов // Светотехника. 2003. № 6.
2. Технический доклад МКО «Измерения СИД». (Technical report “Measurement of LED’s” CIE127-1997 [ISBN 3 900 734 84 4]).
3. Никифоров С. Г. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным // Компоненты и технологии. 2006. № 3.
4. Никифоров С. Г., Сушков В. П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN. Доклад на конференции «Нитриды галлия и алюминия». МГУ. 2007. Январь.
5. Никифоров С. Г. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и Технологии. 2005. №9. Компоненты и Технологии. 2006. №1.
6. Agaphonov D., Murashova M., Nklphorov S., Plnchuk O., Stolyarevskaya R.. Red led railway traffic lights visional perception research // CIE session 2003, San Diego. Proceedings, vol. 2.
7. Agafonov D., Anikin P., Nikiforov S. On design and manufacturing of led and systems based on led // “Light and engineering”, Vol. 11, Number 1, 2003.
8. ГОСТ 25695-91. Светофоры дорожные. Типы. Основные параметры.
9. ГОСТ 24179-80. Светофильтры, светофильтры-линзы, линзы, рассеиватели и отклоняющие вставки стеклянные для сигнальных приборов железнодорожного транспорта. Технические условия.
10. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО), публикация МКО № 2.2(ТС-1.6). Цвета световых сигналов. 1975.