

УДК 681.7.069.2

ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Гушо Ю.П., д.т.н., проф., **Таганов С.А.**, **Дергунов Н.И.**, **Гушо М.А.**,
Ванярхо В.Г., к.т.н., проф., **Чочуа К.А.**, МГТУ МИРЭА, ООО «КОЛЬЦО»,
E-mail: gusho@mail.ru, Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрены четыре поколения бытовых источника света (1-ое - лампы накаливания, 2-е – люминесцентные, 3-е – светодиодные лампы, к 4-му отнесены лампы на базе лазерных полупроводниковых диодов, или лазерные источники света, ЛИС). При преобладании на рынке источников света 1,2,3 типов, наиболее энергоэффективны 3 – светодиодные лампы, и их применение растет быстрыми темпами, с замещением ими ламп 1 и 2 типов. К сожалению, светодиодные источники небезопасны для человека, имеется все больше сведений о влиянии их спектра на зрение и психофизическое состояние. Рассмотрены преимущества ЛИС перед светодиодными лампами благодаря возможности регулировки спектра излучения ЛИС вплоть до имитации естественного света, с учетом суточных колебаний спектра и освещенности, регулировкой направленности излучения. Предложено технологическое решение создания ЛИС на основе сборки лазерных диодов R,G,B типа и специального фильтра – рельефографического спеклоподавителя (авторская разработка) для преобразования когерентного излучения лазеров в некогерентное излучение. Рассмотрены преимущества ЛИС и возможные сферы их применения.

Ключевые слова: лампы накаливания, люминесцентные лампы, светодиодные лампы, лазерные источники света, конструкция лазерных источников света, энергоэффективность, экологичность

LASER LIGHT SOURCES

Gusho Y. P., D.ofSci.(Tech), prof., **Taganov S. A.**, **Dergunov N. I.**, **Gusho M. A.**,
Vanjarho V. G., Ph.D., prof., **Tchotchua K. A.**, MSTU MIREA, LLC "Koltso",
E-mail: gusho@mail.ru, Moscow, Russia

Abstract: Are considered four generation household light sources (1st - incandescent lamp, 2 - fluorescent, 3 - led lamps, to the 4th lamp type are attributed semiconductor laser diodes, or laser light sources, LLS). With the dominance in the market of light sources 1,2,3 types, the most energy efficient is type 3 - led lamps, and their use is growing rapidly, with the replacement of lamps of 1 and 2 types. Unfortunately, the led sources are unsafe for humans, there is increasing information about the impact of their spectrum on human vision and psychophysical state. The advantages LLS led lamps due to the possibility of adjustment of the emission spectrum of the LLS up to simulate natural light, taking into account daily fluctuations of the spectrum and light adjustment of the radiation pattern. The proposed technical solution of creation of LLS - based on assembly laser diodes R,G,B types and special filter reliefographic of spectrophotometer (authoring) for converting a coherent laser radiation in incoherent radiation. The advantages of LLS and possible applications.

Keywords. incandescent lamps, fluorescent lamps, led lamps, laser light sources, design of laser light sources, energy efficiency, environmental friendliness

Источники света третьего поколения

Мировая энергетика расходует 20% своих мощностей на освещение. В 2016 году затраты на освещение составит 20 Млрд долларов. Рынок осветительных приборов, который в настоящее время растет в среднем на 28% в год, в 2016 году составит 6,4 млрд. долларов. По данным аналитической компании [1] светодиодные светильники покрывают 60% рынка подсветки, а 40% рынка постепенно замещаются светодиодными светильниками, вытесняя лампы предыдущих поколений.

На глобальном рынке в настоящее время представлены три поколения ламп. К 1-ому поколению относятся лампы накаливания, включая галогенные, ко 2-му – люминесцентные лампы, к 3-му поколению – светодиодные лампы. Лампы 1-го и 2-го поколения сейчас активно замещаются светодиодными лампами 3-го поколения. Многократное удорожание светодиодных источников света компенсируется снижением энергопотребления по сравнению с лампами накаливания. Применение светодиодных ламп приведёт в 2016 году к двукратному сокращению всей потребляемой в мире энергии на освещение.

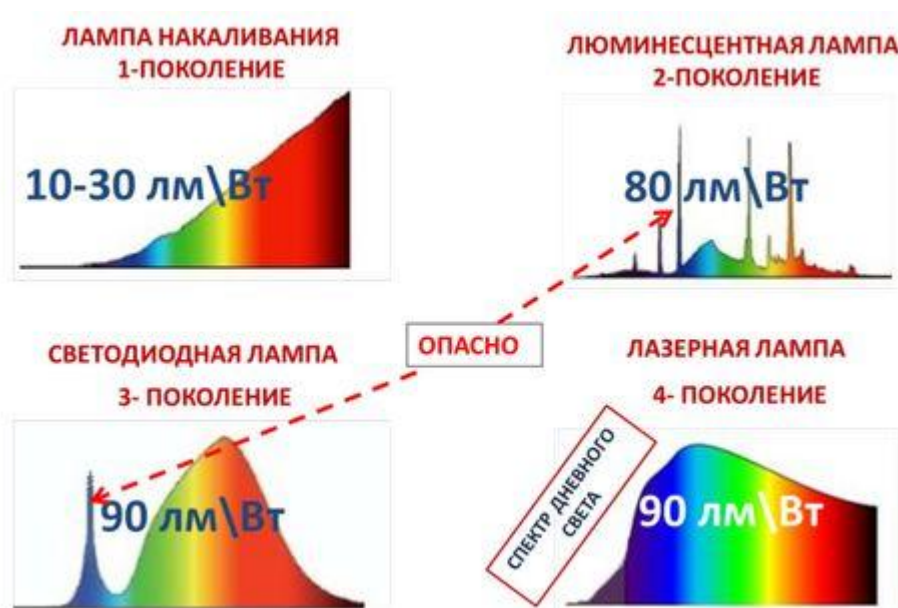


Рис.1. Спектры излучения различных светильников и дневного света.

Подавляющее большинство светильников выпускается на основе светодиодов Nichia, Cree, Samsung LED, LG Innotek и OSRAM [5]. Согласно анализу проведённого аналитической компанией “Strategies Unlimited” за 2013 год общий доход глобального рынка LED светодиодных светильников составил \$4,1 млрд. В 2011 году доходы японского рынка составляли 50% от всего рынка LED светильников (\$622,5 млн. из \$1,24 млрд.), далее следуют Северная Америка и Европа, имеющие 42,4% (\$524 млн.).

К 2016 году ожидается, что японский рынок освещения будет составлять 34% рынка (от общего дохода \$4,3 млрд.). На Северную Америку и европейские рынки будет приходиться 44% мирового дохода. Доходы рынка Китая за 2011 составили \$75,90 млн. В дальнейшем прогнозируется устойчивый рост LED светильников для внутреннего рынка Китая. Мировые бренды расширяют свое присутствие в странах с развивающейся экономикой (расширение Starbucks в Индии в 2012 году). Доходы от остального мира за 2011 год составляют \$5 млн. Среднегодовой темп роста стран с развивающейся экономикой с 2011 по 2016 составит 129%, достигнув \$317,54 млн. в 2016 году [1].

Для характеристики ламп используются три основных параметра: светоотдача, измеряемая в лм/Вт, цветопередача Ra, цветовая температура, измеряемая в градусах Кельвина, K^0 . **С появлением светодиодных ламп появился четвёртый параметр - угловая расходимость источника света.** Теперь есть возможность экономить энергию, фокусируя свет именно на ту поверхность, которую необходимо осветить. Современные светодиодные источники света имеют первоначальную расходимость от тела свечения площадью 2мм^2 около 180 градусов, но при использовании дополнительной оптики и отражателей можно достичь угла расходимости 15 градусов с потерями света около 30%.

В ряде областей применение светодиодных ламп ограничено из-за вредного влияния излучения светодиодов на физическое и психическое здоровье человека. К настоящему моменту в мировой литературе накопилось до 1000 офтальмологических публикаций о конкретных механизмах этой «сине-голубой» опасности, подтверждающих её серьёзность в провоцировании необратимых возрастных потерь зрения [6].

Выявлено негативное влияние освещения светодиодными лампами на детей до 14 лет из-за вредного неустраняемого избыточно интенсивного спектра излучения в диапазоне 440-460 нм. Интенсивность излучения этого спектра в 80 раз превышает допустимые детские нормы (см. рис.2) [6]. Эффект накопления такого воздействия приводит в конечном итоге к неизлечимой слепоте. Фоторецепторные клетки взрослых людей также чувствительны к интенсивному спектру излучения 440-460 нм, приводящему к нарушению сна и циркадных ритмов человека [7].

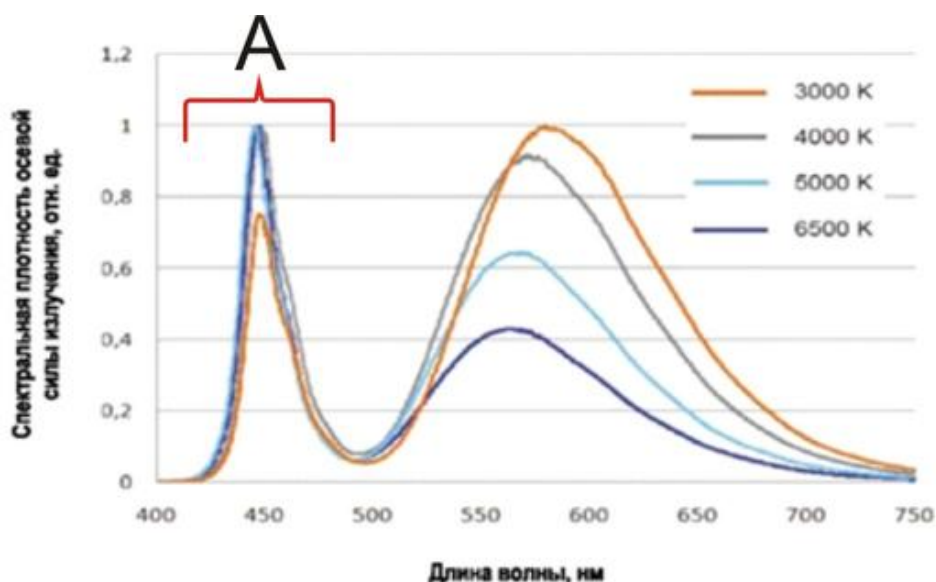


Рис.2. Негативное влияние освещения светодиодными лампами [6]. А - интенсивный спектр излучения 440-460 нм, приводящему к нарушению сна и циркадных ритмов человека.

К сожалению, как показывает практика, у светодиодов есть недостатки, влияющие на здоровье человека, энергосбережение и качество освещения.

Альтернативным источником света, превосходящий СИД по энергосбережению и рядом других характеристик является лазерный диод. Проблемой, ограничивающей использование лазерных диодов, является негативный эффект, сопровождающий использование лазерного (когерентного) излучения, а именно – спекл-структуры

Цель нашей работы создание нового ИС 4-го поколения на базе ЛИС без спекл-структур.

Для реализации данной цели, в частности, используется разработанный в лаборатории нанoeлектрооптики МГТУ МИРЭА рельефографический модулятор света.

Источники света четвёртого поколения

Недостатки светодиодных источников света можно устранить, используя полупроводниковые лазерные источники. Практическое использование лазерных диодов вместо светодиодов уже началось [8,9,10,11].

В настоящее время идут активные разработки источников света 4-го поколения на основе лазерных диодов. Лазерные источники света (ЛИС) смогут приблизиться по спектральному составу к дневному освещению (Рис.1). Известно, что сетчатка глаза имеет три вида экстерорецепторов (колбочек), каждая из них даёт свой отклик на определённую длину волны видимого спектра. (560 нм , 530 нм и 420 нм)[2,3].

Сравнив возбуждение всех трех типов колбочек, зрительная система воспринимает цвет объекта, в зависимости от соотношения мощностей этих трех RGB линий спектра излучения источника света[4]. Чем уже полоса частот каждой линии, тем больше лазерный источник света создает видимость сплошного спектра. Лазерный луч, зачастую, вообще монохроматичен.

Теоретический предел светоотдачи лазерных диодов - 80%, а у светодиодных источников - 50% [12]. Светоотдача лазерных диодов в видимом диапазоне излучения удваивается каждые 3-5 лет и приближается к 40%, инфракрасные лазерные диоды имеют уже сейчас около 60%. Кроме энергосбережения когерентный источник света позволяет управлять углом расходимости света, начиная с 1 градуса, требуя при этом минимум оптических элементов. Благодаря возможности коллинеарного сложения трёх цветов, возможно получение любого спектрального состава освещения. Более того, спектром освещения можно управлять в течение суток в соответствии с солнечным спектром или по любому заданному закону. Подбор спектра излучения ЛИС в зависимости от режима труда и отдыха увеличивает производительность труда в 1,5 раза и нормализует психологическое состояние.

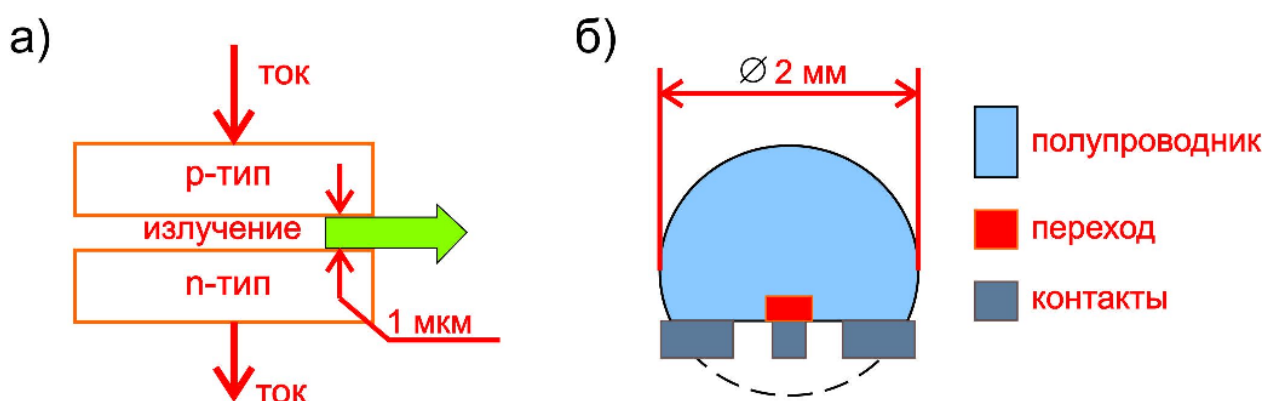


Рис.3. Площади тел свечения: а) лазерных б) светодиодных источников света [13,15].

Величина яркости на единицу потребляемой мощности в ЛИС в 10000 раз выше, чем у светодиодных источников, благодаря тому, что размер тела свечения лазерного диода на порядки меньше тела свечения светодиода (рис.3).

Действительно, согласно закону инварианта $[Вт/(\Omega \cdot м^2)]$, где L – энергетическая яркость; P - мощность излучения (Вт); S -площадь источника ($м^2$); Ω - телесный угол, эффективная яркость светильников обратно пропорциональна размер тела свечения. Как показано в [13, 15] эффективная яркость светильников при мощности в 1 Вт:

- 1 и 2 поколения $\sim 0,1 \text{ Вт}/(\Omega \cdot \text{м}^2)$;
- 3 поколения $\sim 0,14 \text{ Вт}/(\Omega \cdot \text{м}^2)$ в 1,4 раз эффективнее ламп накаливания
- 4 поколения $\sim 10 \text{ Вт}/(\Omega \cdot \text{м}^2)$ в 70 раз эффективнее светодиода.

Как мы отметили выше, лазерный источник света позволяет получать более широкую цветовую гамму и контрастное изображение (рис.4) [15].

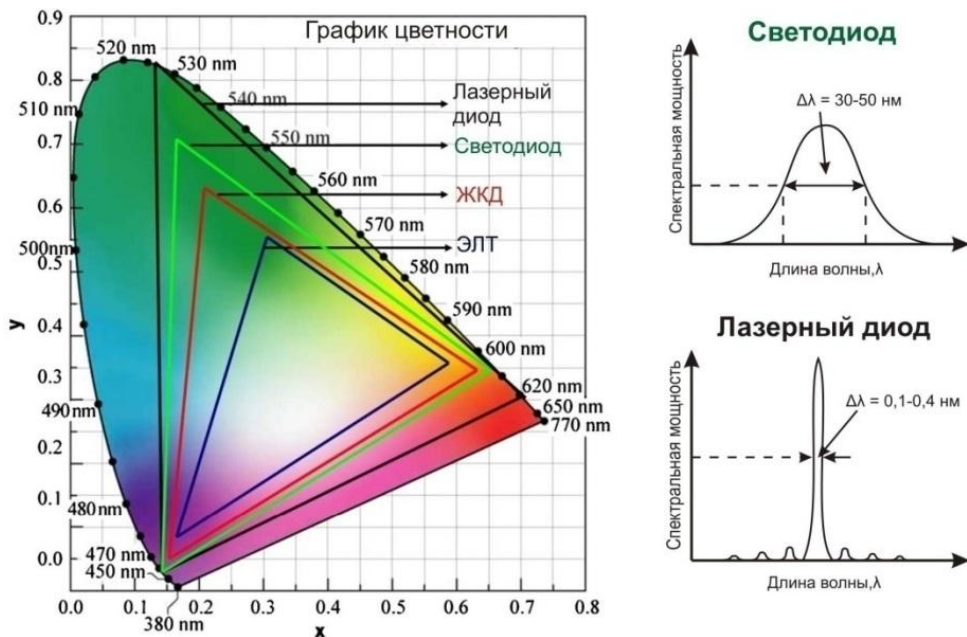


Рис.4. Слева - цветовая гамма дисплеев на базе: ЭЛТ (электронно-лучевая трубка), ЖКД (жидкокристаллический экран), светодиодов и лазерных диодов. Справа - ширина спектра светодиода и лазерного диода [15].

При достижении максимального значения световой отдачи у светодиодов происходит спад эффективности, который связан с увеличением плотности тока (рис.5) [16].

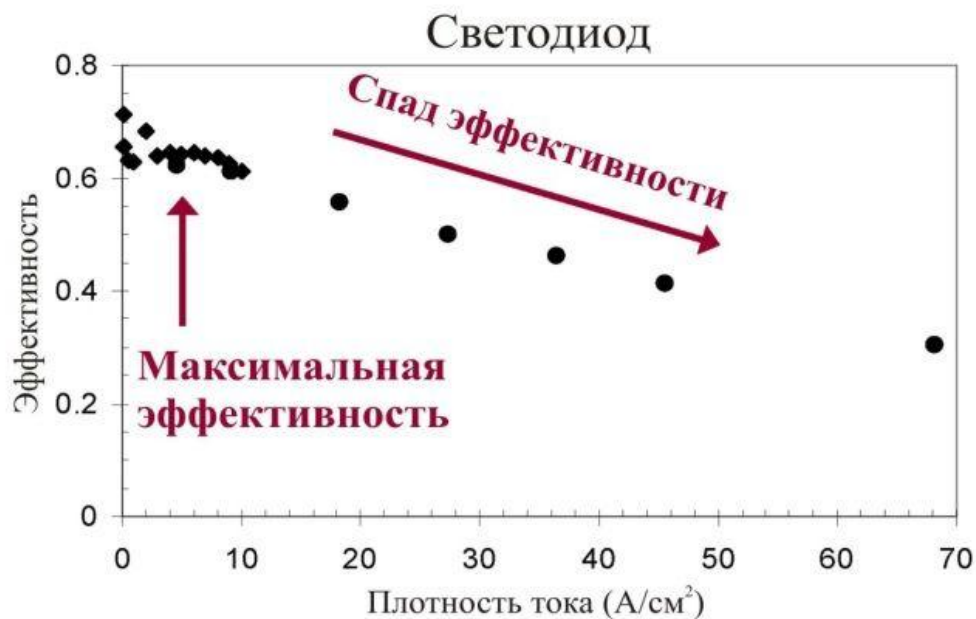


Рис.5. Спад эффективности светодиода при повышении плотности тока [16].

Лазерные диоды не имеют данного ограничения и более эффективно преобразовывают электрическую энергию в оптическую (рис.6) [16].

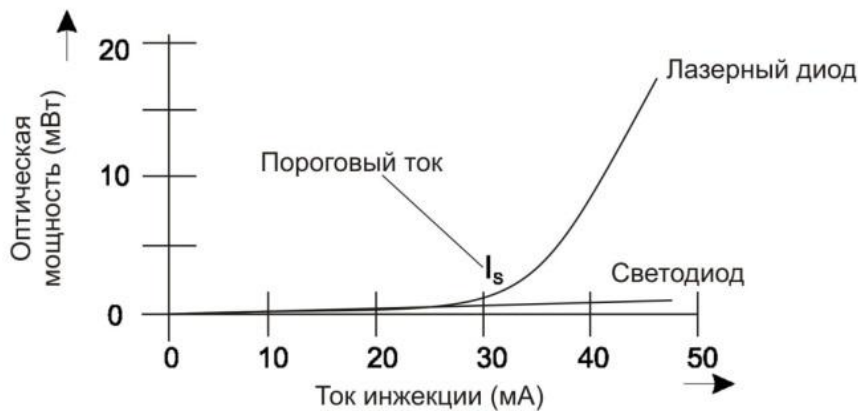


Рис.6. ВАХ лазерного диода [17].

Два главных ограничения для применения лазерных источников света для освещения: высокая цена и наличие спекла вследствие когерентности лазерного излучения.

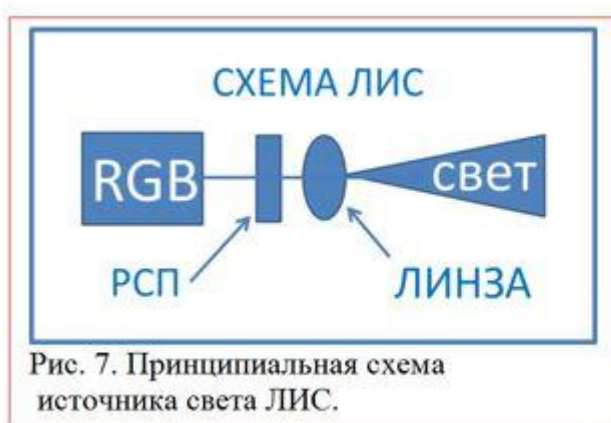
В настоящее время ситуация существенно изменилась.

Во-первых, появились компактные и эффективные зелёные лазеры без удвоения частоты. Их иногда называют «прямыми зелёными лазерами». В 2011 году первые

прямые зелёные лазеры производства OSRAM стоили 1500 Евро. Сейчас поставщиков больше десятка и цена того же лазера в OSRAM упала до 25 Евро в розничной продаже. При массовом производстве в 2017 году ожидаемая цена лазерного диода должна составлять не более 3-4 Евро. Количество лазерных полупроводниковых диодов в настоящее время в 10 раз меньше, чем светодиодов. По мере увеличения количества лазерных диодов для целей освещения их цена ещё больше будет падать.

Во-вторых, если разрушить когерентность, то лазерные источники света 4-го поколения будут обладать целым рядом указанных выше дополнительных преимуществ по сравнению с источниками 1-го, 2-го и 3-его поколений. Мы разработали эффективный, компактный и дешёвый рельефографический спеклоподавитель (РСП) для преобразования когерентного (векторного) излучения в некогерентное (скалярное) обычное излучение (см. ниже). Предлагаемые нами лазерные источники света 4-го поколения (ЛИС) компактны и при подавлении спекла не содержат инерционные и движущиеся части [18].

Технология создания ЛИС заключается в конструировании RGB источника в сочетании с дихроикой так, чтобы на выходе этого источника мы получили белый свет. Управление мощностями трёх лазерных диодов в автоматическом или ручном режиме позволяет создать освещение, подобное дневному в диапазоне цветовой температуры от 2500К до 10000К. С помощью линзы или диффузора угол расходимости может быть создан, начиная от 1 градуса. Используя подавитель спекл-структуры, в который встроен электронный блок, создающий бегущую волну на поверхности рельефного носителя, может быть создан заданный контраст спекла. Измерение контраста спекла можно выполнить по известной методике [19], которую мы использовали в наших экспериментах. В прецизионных осветительных устройствах с нашим РСП этот контраст может быть доведён до нулевого уровня, благодаря использованию фильтра в фазовой плоскости подавителя спекла [20]. Принципиальная схема источника света ЛИС и характерный размер трёх лазерных диодов показаны на рис. 7 и 8.



В основу предложенной технологии преобразования излучения в обычный скалярный световой поток положено разработанное нами новое направление прикладной физики [18,20]. Техническая реализация этой идеи выглядит следующим образом: на первой диэлектрической подложке наносится структура электродов, на второй прозрачной аморфной диэлектрической подложке с тонким прозрачным проводящим слоем нанесён упруго-вязкий прозрачный слой с диэлектрической проницаемостью, совпадающей со второй прозрачной диэлектрической подложкой [20. стр. 302-312]. Модулятор света «Рельеф», на базе которого сделан РСП имеет следующие характеристики.

- Экспериментальная дифракционная эффективность – 98.6 %
- Частота переключения сигнала ~ 500 кГц
- Поглощение и рассеяние света носителем пренебрежимо мало
- Рабочий диапазон температур: от -50°C до +80°C
- Количество элементов в строке (пикселей) - 128...2048
- Средняя мощность модулируемого излучения – 3,3 Вт/см²
- Пиковая мощность модулируемого излучения – 105 Вт/см²
- Низкая стоимость, сравнимая с LCD модулятором

Серийное производство МС «Рельеф» будет сравнимо по стоимости с производством LCD. Функциональные возможности МС «Рельеф» превышают DMD модуляторы. Габаритные размеры модулятора МС «Рельеф», включая электронные схемы, зависят от уровня интеграции прибора и назначения. Для лазерных светильников диаметр рабочей зоны составляет 3-5 мм. Схема подавителя спекла РСП показана на рисунке 9.

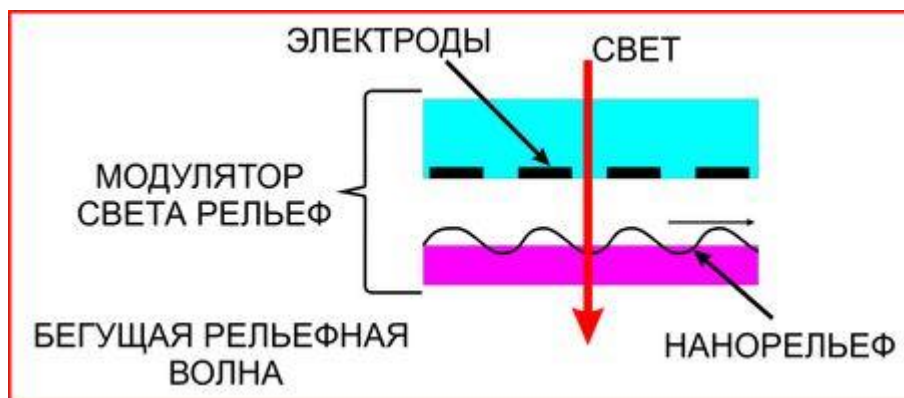


Рис.9. Схема подавителя спекла РСП

Подавитель спекла представляет собой сборку из двух упомянутых диэлектрических пластин с газовым зазором между ними. Аналоги такого класса подавителей спекла нам не известны. Конкурентные решения по техническим, эксплуатационным и ценовым характеристикам на порядки уступают предлагаемому нами решению. Предлагаемый РСП сочетается с любыми лазерными источниками света, так как его размеры определяются только апертурой этих источников. Его габаритные размеры могут быть масштабированы. Лазерный диод в сочетании со спекло-подавителем позволит создать продукт, относящийся к прорывному нанотехнологическому источнику света следующего (четвёртого) поколения [18].

Особо важно подчеркнуть, что РСП принципиально не поглощает световую энергию, проходящую через него. Излучение только изменяет направление, без потери мощности. Стохастические фазовые изменения излучения, возникающие в результате работы подавителя спекла, не сказываются на яркости изображения, при этом резко повышают его контраст. При подаче управляющего сигнала на прозрачные электроды, nano-структура слоя деформируется в nano-диапазоне 1-30 нм, что приводит к изменению фазового распределения в излучении и к изменению спекл-структуры в плоскости изображения. Сглаженные формы бегущих волн не вызывают неуправляемой дифракции [21].

В зависимости от практического применения, могут быть созданы различные типы электрических сигналов, формирующих стохастические nano структуры на поверхности упруго-вязкого слоя. Пример подавления спекл-структуры показан на рис. 10.

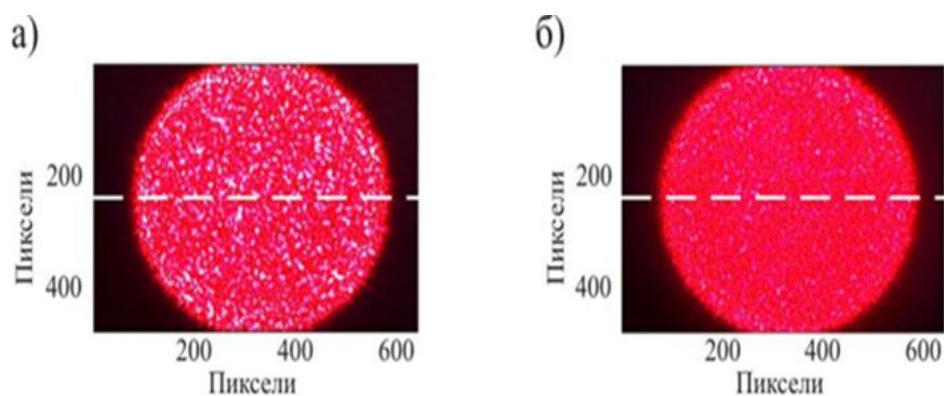


Рис. 10. Пример подавления спекла а) до включения рельефографического модулятора б) после включения рельефографического модулятора.

Освещение помещения

Направленность света лазерных диодов (минимальный угол расходимости от 1 градуса) позволяет при той же освещенности объекта снизить потребляемую электрическую мощность по сравнению со светодиодами (в которых минимальный угол расходимости составляет 15 градусов).

Продемонстрируем это на примере освещения учебного помещения. В качестве объекта освещения возьмем классную комнату. Согласно нормам проектирования общеобразовательных школ и школ-интернатов [22] необходимо создать освещенность в 400 лк [23] искусственного освещения в классной комнате, например, площадью 50 м². Классная комната, рассчитанная на 36 учеников, должна иметь следующие габаритные размеры 8х6,25х3,3 м. Сравним два светильника: светодиодный светильник “Премиум” для образовательных учреждений компании Varton [24] и лазерный светильник, смоделированный в программе Zemax [25].

Программа Zemax позволяет проектировать лазерные источники света. Для этих целей был выбран источник света с гауссовым распределением лучей. Для проектирования белого цвета использовалась схема RGB - три ИС с различной длиной волны. Для проектирования были выбраны имеющиеся в продаже следующие лазерные диоды [26-28]:

- Красный лазерный диод – $\lambda = 638$ нм; $\eta = 38,8$ %.
- Зеленый лазерный диод – $\lambda = 530$ нм; $\eta = 15$ %.
- Синий лазерный диод – $\lambda = 450$ нм; $\eta = 27,7$ %.

Где λ – длина волны, η – КПД.

Далее в Zemax был выполнен расчет оптической мощности излучения для получения цветовой температуры в 6500 К и моделировалась КСС. После проведения всех расчетов создавался файл IES с фотометрическими данными светильника.

Следует отметить, что один светодиодный светильник Varton состоит из 4-х модулей мощностью в 9 Вт. Причем каждый модуль состоит из 90 люминесцентных светодиодов мощностью в 0,1 Вт. В итоге мы получаем светодиодный светильник мощностью в 36 Вт и световым потоком в 3277 лм, с учетом потерь на рассеивателе,.

Лазерный источник света так же состоит из набора лазерных диодов, а именно 11 красных лазерных диодов общей мощностью в 1,8 Вт; 37 зеленых лазерных диодов общей мощностью в 1,06 Вт и 3 синих лазерных диодов общей мощностью в 5,7 Вт. В итоге мы получаем лазерный светильник мощностью в 76 Вт и световым потоком, с учетом потерь в оптике, в 4000 лм.

Расчет освещенности проводился в специализированной программе Dialux evo. Результаты расчета представлены на рис.11.

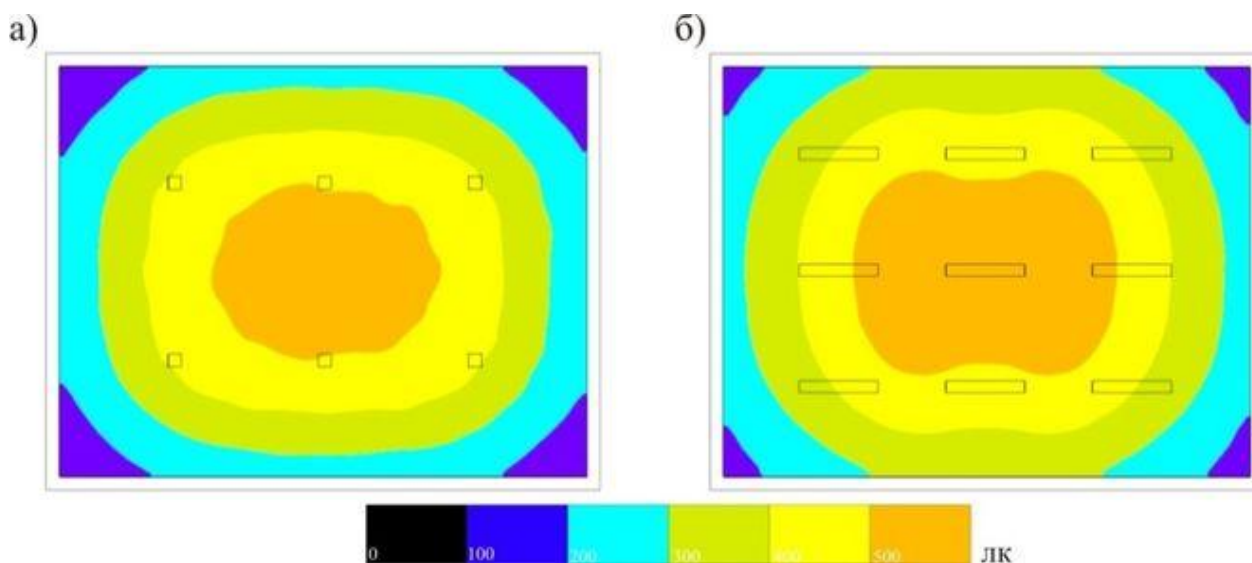


Рис.11. Расчет освещенности классной комнаты с габаритными размерами 8х6,25х3,3 м а) лазерным светильником и б) светодиодным светильником “Премиум”.

В обоих случаях световой поток одинаков при заданной освещённости 400 лк и неравномерности 2:1. Результаты расчёта сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Наименование	Светодиод	ЛИС	ЛИС (прогноз)
Марка	Varton “Премиум” V-01-066-036- 6500K	RGB лазерные диоды $\eta(\text{red}) = 38,8 \%$ $\eta(\text{green}) = 15 \%$ $\eta(\text{blue}) = 27,7 \%$	RGB лазерные диоды ($\eta = 38,8 \%$)
Количество ламп	9	6	6
Цветовая температура, К	6500	6500	6500
Общий световой поток, лм	29493	24000	24000
Общая мощность электр., Вт	324	387	240
Световая отдача, лм/Вт	91	62	100
Наличие вредного спектра излучения (400-460 нм)	да	нет	нет
Автоматическое и избирательное управление спектром	нет	да (2500 – 8000 К)	да (2500 – 8000 К)
Автоматическое управление цветовой температурой в течении суток	нет	да	да

Согласно полученным данным мы можем отметить, что количество светильников сократилось в полтора раза, что компенсирует небольшое увеличение мощности. Помимо этого ЛИС имеет массу преимуществ, которые отсутствуют у светодиодных светильников, например, отсутствие вредного излучения (400-460 нм) и возможность автоматически управлять цветовой температурой в течении суток, повышение работоспособности в 1,5 раза. При КПД в 38,8% лазерных диодов, экономия электрической мощности увеличится на 40%, а значение светоотдачи ЛИС до возрастает 100 лм/Вт (см. четвертую колонку таблицы 1.)

Удаленная подсветка

Направленность света лазерных диодов (минимальный угол расходимости от 1 градуса) позволяет эффективно подсвечивать удаленные объекты по сравнению со светодиодами.

Продемонстрируем это на примере удаленной подсветки площадки размером $2 \times 2 \text{ м}^2$ с разного расстояния (2,5, 10, 30 и 50 м). Сравним два светильника: светодиодный прожектор для промышленного освещения компании Varton [24] со световым потоком в 4 раза большим лазерного и лазерный светильник, смоделированный нами в программе Zemax. (таблица 2).

Графическая зависимость освещенности площадки $2 \times 2 \text{ м}$ от расстояния для двух светильников представлена на рис.12.

Таблица 2

Наименование	Светодиод	ЛИС	ЛИС (прогноз)
Марка	Varton для	RGB лазерные диоды	RGB лазерные

	промышленного освещения	$\eta(\text{red}) = 38,8 \%$; $\eta(\text{green}) = 15 \%$; $\eta(\text{blue}) = 27,7 \%$	диоды ($\eta = 38,8 \%$)
Количество ламп	1	1	1
Цветовая температура, К	6500	6500	6500
Световой поток, лм	15283	4523	4523
Мощность электрическая, Вт	180	73	45
Световая отдача, лм/Вт	85	62	100
Средняя освещ. площадки $2 \times 2 \text{ м}^2$ на расстоянии 2 м, лк	685	908	908
Средняя освещ. площадки $2 \times 2 \text{ м}^2$ на расстоянии 5 м, лк	137	903	903
Средняя освещенность площадки $2 \times 2 \text{ м}^2$ на расстоянии 10 м, лк	35	687	687
Средняя освещ. площадки $2 \times 2 \text{ м}^2$ на расстоянии 30 м, лк	4	505	505
Средняя освещ. площадки $2 \times 2 \text{ м}^2$ на расстоянии 50 м, лк	1	248	248
Наличие вредного спектра излучения (400-460 нм)	да (неустранимо)	нет	нет
Автоматическое управление спектром	нет	да (2500 – 8000 К)	да (2500 – 8000 К)
Автоматическое управление цветовой температурой	нет	да	да

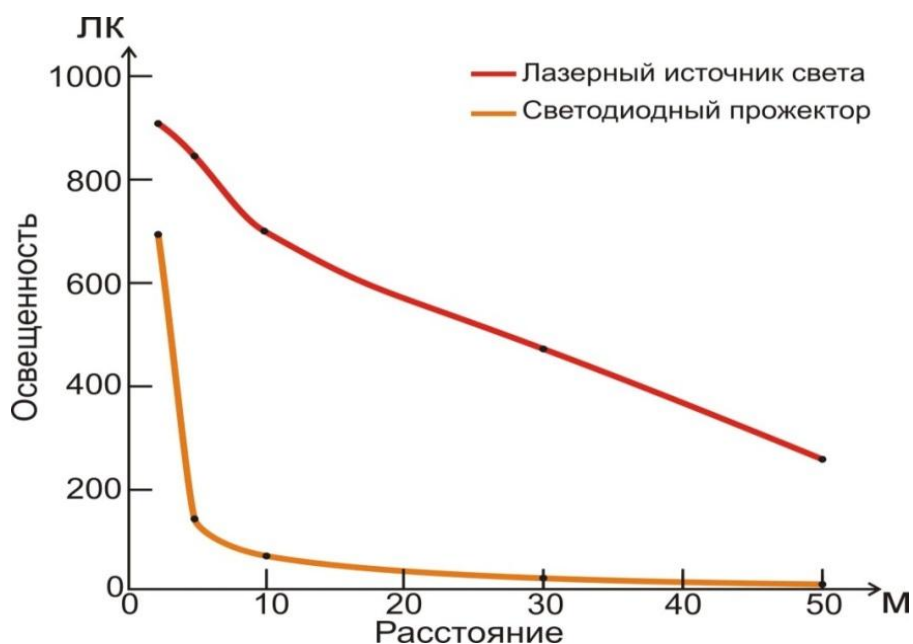


Рис.12. График освещенности площадки $2 \times 2 \text{ м}^2$ на различном расстоянии для лазерного источника света и светодиодного прожектора. При этом световой поток светодиодного прожектора заранее выбран в 4 раза больше лазерного (См. таб.2.)

Используя существующие лазерные диоды, можно эффективно подсвечивать удаленные объекты к тому же разным цветом и оттенком, чего нельзя сказать о светодиодных прожекторах. Помимо этого, ЛИС позволяет освещать помещение и объекты здоровье сберегающим источником света с управлением спектром излучения и цветовой температурой в реальном времени аналогично дневному режиму освещения.

Заключение

1. Светильники на основе светодиодов не пригодны для здорового бытового освещения, и, рано или поздно, этот сегмент рынка будет замещён светильниками на основе лазеров, позволяющих управлять спектром излучения и цветовой температурой в течение суток в соответствии с дневным солнечным циклом. А возможность регулирования угла расходимости светового потока от 1 градуса позволяет создавать художественное оформление интерьеров и экстерьеров в динамическом и статическом режимах.

2. По оценкам нашей компании через 2-3 года рынок будет насыщаться, и появится интерес к здоровьесберегающим лазерным средствам освещения для медицинских операционных, детских учреждений, а также средствам коррекции психофизического состояния человека и особенно VIP потребителей для бытового освещения.

3. Особый интерес лазерные светильники с возможностью коррекции спектра излучения в течение суток представляют для медицинских, швейных и других организаций, в которых искажение цвета освещаемых предметов недопустимо. Во всех случаях возможность управления углом рассеивания светового потока позволяет экономить энергию благодаря концентрации света на заданном пространстве.

4. Важным и принципиально необходимым сегментом рынка для здоровьесберегающих лазерных источников света является **космос**, где ежегодное потребление громоздких и вредных для здоровья люминесцентных ламп для обитаемой российской космической станции и грузовых кораблей составляет около 1.500 штук в год, а для наземных объектов около 20.000 штук в год. По оценкам специалистов применение здоровьесберегающих лазерных источников света увеличит работоспособность космонавтов и сотрудников наземных служб примерно в 1.5 раза [30,31, 32]. В этом сегменте для ламп 4-го поколения нет реальных конкурентов.

5. Рынок подсветки удваивается каждые два года и к 2016 году составит \$4,2 млрд. [1]. Трудно предвидеть объем рынка удалённой подсветки для лазерных источников света. Можно надеяться, что благодаря возможности создания углов расходимости от 1 градуса для направленной точечной и/или удалённой подсветки объектов, создания необычных спецэффектов, проекции статических и динамических изображений, это направление займёт определённую нишу на рынке.

6. Особую и перспективную нишу для лазерных источников света представляет рынок проекторов различных назначений. Он растёт по линейному закону и будет составлять в 2017 году около 9 млрд. долларов [33].

7. Следует обратить внимание, что в паспортных данных светильников, продающихся на российском рынке, светоотдача светильников указывается без учета потерь оптики, рассеивателей, отражателей и др. Вследствие этого, как показано в статье [29], реальный световой поток на 30-40% ниже указанного в паспорте. Для лазерных источников благодаря направленности и равномерности светового потока эти потери будут существенно ниже.

Список литературы

1. Аналитическая компания Strategies Unlimited .“LED Downlights. Market Analysis and Forecast 2014”
2. Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM (2000). Principles of Neural Science (4th ed.). New York: McGraw-Hill. pp. 182–185. ISBN 0-8385-7701-6.
3. Jacobs GH, Nathans J (March 2009). "Color Vision: How Our Eyes Reflect Primate Evolution". Scientific American.
4. Neumann, Alexander; Wierer, Jonathan J.; Davis, Wendy; Ohno, Yoshi; Brueck, Steve R. J.; and Tsao, Jeffrey Y. Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality Optics Express, 19, A982-A990 (2011).
5. Световой Клондайк, Эксперт №23 (806), 2012
<http://www.rusnano.com/about/press-centre/76369>
6. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков, Светотехника №3, 2012
7. Использование энергии света: от фотонов к здоровью человека, Светотехника №4, 2014
8. http://www.nasa.gov/centers/kennedy/home/plant_growth.html.
9. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/651.html
10. <http://www.colorvision-lasers.com/technology.aspx>
11. Lasers could offer alternative to LED light sources, 2011,
<http://ledsmagazine.com/news/8/11/2>
12. Диодные лазеры – экономическое чудо, Фотоника 4/2009
<http://www.photonics.su/journal/article/2564>
13. P.Janssens, K.Malfait, P.Vandenbergh, A.Grillet, Fiber laser for RGB display applications: A potential market. 4-th International Workshop on Fiber Lasers, Dresden, 6-th

November 2008. <http://www.docstoc.com/docs/149536713/Fiber-lasers-for-rgb-display-applications-A-potential---Osiris-Project-6>

14. Meifang Xu ; Wenhong Gao ; Yunbo Shi ; Pengfei Zhao ; Jun Liu, et al." Effect of the projection lens on speckle contrast measurement in laser projection displays ", Proc. SPIE 8560, LED and Display Technologies II, 85600D (November 27, 2012); <http://dx.doi.org/10.1117/12.9997237>

15. Kishore V. Chellappan, Erdem Erden, and Hakan Urey, "Laser-based displays: a review," Appl. Opt. 49, F79-F98 (2010).

16. M. H. Crawford, "LEDs for solid-state lighting: performance challenges and recent advances," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 15(4), 1028–1040 (2009).

17. Basics on laser diodes - Imedeia. – Режим доступа: http://www.imedeia.uib.es/~salvador/coms_optiques/addicional/profile/profileLD.pdf

18. ООО «КОЛЬЦО» , www.sk-koltso.com

19. Roelandt S., Meuret Y., Craggs G., Verschaffelt G., Janssens P., and Thienpont H. Standardized speckle measurement method matched to human speckle perception in laser projection systems // Optics Express.2012.V. 20(8).P.8776-8778.

20. Гуцо Ю.П. Фазовая рельефография, Наука, Москва, 1999

21. Гуцо Ю.П., Дергунов Н.И., Таганов А. Заявка на изобретение, ООО «КОЛЬЦО», RU 2013144827 «Спекло-подавитель для лазерного излучения», 2013.

22. СНиП II-Л.4-62 Общеобразовательные школы и школы-интернаты. Нормы проектирования.

23. СанПиН 2.2.1-2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий

24. Каталог профессионального освещения VARTON.[Электронный ресурс].Режим доступа к журналу: <http://varton.ru/files/docs/11413790482.pdf>

25. ZEMAX: Руководство пользователя – 2002

26. Mitsubishi Electric Develops New Red Laser Diode for Projectors with Industry-leading Output Power. [Электронный ресурс]. Режим доступа к журналу: <http://www.mitsubishielectric.com/news/2014/pdf/0617.pdf>

27. V. Bhatia, N. Sekiguchi, M. Hempstead, A. Okada, J. M. Grochocinski, "High Efficiency Green Lasers for Mobile Projectors", Proc. SPIE 7582, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications IX, 758202 (2010).

28. Blue Laser Diode 1.6 W in TO56 Package[Электронный ресурс].Режим доступа к журналу: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00088311_0.pdf/PL%20TB450B.pdf.

29. Евдасев И.С. Коэффициент использования светового потока уличных LED-светильников. Современная светотехника №1, 2010.

30. Гвоздев С.М. и др. «Влияние пространственно-частотных характеристик органа зрения на психофизиологическое состояние человека и его работоспособность», «Авиакосмическая и экологическая медицина», 2009, Т.43, №3, стр.24-28.

31. Гвоздев С. М., Управление освещением для повышения комфортности цветоцветовой среды и работоспособности человека. Энергосбережение, №1/2010. С. 42-46.

32. Патент РФ № 2428957, Способ диагностики состояния зрительной системы человека и коррекции психофизиологического состояния человека на основе выявленных изменений, от 20.01.2010г, Гвоздев С.М. и др.

33. Pico Projectors, Global Industry Analysts, Inc. Business Report MCP-7468