

**Особенности проектирования и
эксплуатации светодиодного
оборудования.
Строение светодиодов и их
основные характеристики.**

Технический директор ООО «Техносвет групп»

Глади́н Дми́трий Ви́кторович

Особенности проектирования и эксплуатации светодиодного оборудования. Строение светодиодов и их основные характеристики

Дмитрий Гладин, технический директор ООО «Техносвет групп»

В настоящей статье рассмотрены особенности, связанные с производством и эксплуатацией светодиодного оборудования для сельского хозяйства, затронуты вопросы строения светодиодов и влияния условий эксплуатации на наиболее важные характеристики светодиодного оборудования.

Наша цивилизация постоянно познает и преобразует мир, который ее окружает. Любознательность и тяга к новому позволила человеку выйти из пещер и начать покорение космоса. В своем доме, которым сегодня называется вся планета Земля, человек сумел создать достаточно комфортные условия для одного вида живых организмов, но в тоже время сейчас существуют изобретенные им же средства, которые в течение нескольких часов или дней могут уничтожить все живое на планете. Можно долго спорить о том, куда приведет человека технический прогресс, безусловно одно, остановить его в известной истории не удавалось никому. Да, в некоторые периоды он замедлялся, в другие, как в наше время, стремительно развивается. Существует множество направлений, в которых человек, проявляя свое любопытство и настойчивость, добился огромных успехов. Мы запускаем космические аппараты к другим планетам, покорили многие смертельные болезни, придумали помощника своему мозгу в виде компьютерных и сетевых технологий.

Познание человеком окружающего мира происходит через органы чувств, одним из которых, наиболее важным и информативным, является зрение. Человеческий глаз устроен таким образом, что способен преобразовать излучение видимого спектра в нервные импульсы, на основании которых мозг проецирует окружающий мир в сознание. Не удивительно, что видимый для органов зрения живых организмов на нашей планете спектр совпадает с самым мощным источником излучения – Солнцем. Это означает, что в основном мы видим мир благодаря отраженному предметами свету от ближайшей к нам звезды. Обладая не самым совершенным зрением среди живых существ на планете, человек постоянно искал источники видимого излучения, которые позволили бы ему получить преимущество перед хищниками и добычей в ночное время,

осветить жилище и позволить в конечном итоге комфортно существовать в любых природных условиях. Первым таким источником, подсказанным самой природой, стал огонь. Химическая реакция горения, достаточно обычная в окружающем человека мире, позволила получить не только искусственный источник света, но и обогреть жилище, а так же научиться есть не только сырое мясо. С того момента прошло много времени, мы освоили другие более эффективные способы получения искусственного света. Одним из них, за которым, несомненно, будущее, является использование света, излучаемого полупроводниковыми структурами. Светодиоды в настоящее время уверенно вошли в нашу жизнь. Позволяя эффективнее, чем ставшие традиционными лампы накаливания и люминесцентные лампы, преобразовать электрическую энергию в световую, и благодаря другим своим преимуществам, светодиоды оказывают существенное положительное влияние на нашу жизнь. Сельское хозяйство не является исключением. Наша компания первой в России приступила к внедрению и более пяти лет занимается разработками систем светодиодного освещения для животноводства. Это не значит, что мы занимаемся светодиодами не более этого времени. Некоторые специалисты предприятия имеют опыт работы с полупроводниковыми в общем и светодиодными технологиями в частности, в течение десятка лет, что и позволяет нам в настоящее время быть на переднем крае разработок в области создания систем освещения на основе диодов, излучающих свет.

Проекты освещения объектов сельского хозяйства создаются с учетом множества иногда взаимоисключающих требований - технических, технологических, экономических и других. В связи с этим мы индивидуально рассчитываем каждый проект, а не предлагаем создавать посредникам, часто слабо разбирающимся в осветительных технологиях, проекты на базе некоторых обобщенных конструкций и модулей. Для получения максимального эффекта от светодиодного освещения необходимо детально разбираться во множестве вопросов, знать которые могут только специалисты. В качестве примера, можно привести обычный светодиодный светильник для освещения клеток с цыплятами-бройлерами, который при всей своей кажущейся простоте, предполагает в конструкции баланс между противоречивыми требованиями обеспечения большого срока службы светодиодов и герметичного, химически и механически стойкого корпуса. Мы в свое время смогли найти компромисс между этими условиями. Были на нашем пути и неудачи, которые в конечном счете позволили находить верное решение. В настоящее время в составе нашей компании есть и специалисты-

химики, и люди, которые не понаслышке знают, в каких условиях эксплуатируются системы освещения на птицефабриках, коровниках и свинарниках. Правильно организованная и взвешенная экономическая политика предприятия позволяет взаимовыгодно работать как с небольшими предприятиями, так и с крупными холдингами. О перспективности и важности данного направления говорит тот факт, что наши системы светодиодного освещения установлены уже на более чем 290 объектах 50 сельхозпредприятий России, Украины, Казахстана и Республики Беларусь.

Светодиод, как устройство, в общем случае, состоит из кристалла (кристаллов), корпуса, контактных групп и оптической системы, которая обеспечивает вывод от кристалла и определенную направленность светового потока, а в случае светодиодов белого свечения преобразование длины волны части излучения кристаллов в другую составляющую видимого спектра (например, желтую и (или) красную) при использовании люминофоров или красителей. Излучение фотонов происходит в области *p-n-перехода* кристалла. Этот эффект был известен еще в начале прошлого века, но из-за малой эффективности и отсутствия технологии производства не находил применения. Работы Макса Планка и Альберта Эйнштейна, за которые он в 1921 году получил Нобелевскую премию (не за разработку теории относительности), позволили выявить важную закономерность процесса поглощения и возбуждения фотонов в материалах. Эта особенность заключается в том, что фотоны излучаются и поглощаются порциями, а следовательно для полупроводниковых структур можно подобрать материал области *p-n-перехода* таким образом, что излучение будет иметь определенную длину волны. Именно поэтому, кристаллы светодиодов различной длины волны имеют разный химический состав и строение.



*Рис.1 Светодиод 5630 CRI80 White LED
компании SAMSUNG*

Кристаллы светодиодов представляют собой твердый раствор химических веществ, произведенных (или, как говорят, выращенных) по определенной технологии. Например, кристаллы светодиодов, излучающих свет в зеленой и синей части видимого спектра, содержат растворы $InGaN/AlGaIn/GaN$ (основные химические элементы – индий, галлий, азот, алюминий), для светодиодов, излучающих свет в красной и желтой части видимого спектра этот состав – $AlInGaP/GaP$ (основные химические элементы кристалла – индий, галлий, алюминий, фосфор).

Для светодиодов $InGaN$, излучающих свет в голубой и синей части (450-470 нм) один из вариантов строения кристалла представлен на рисунке 2.

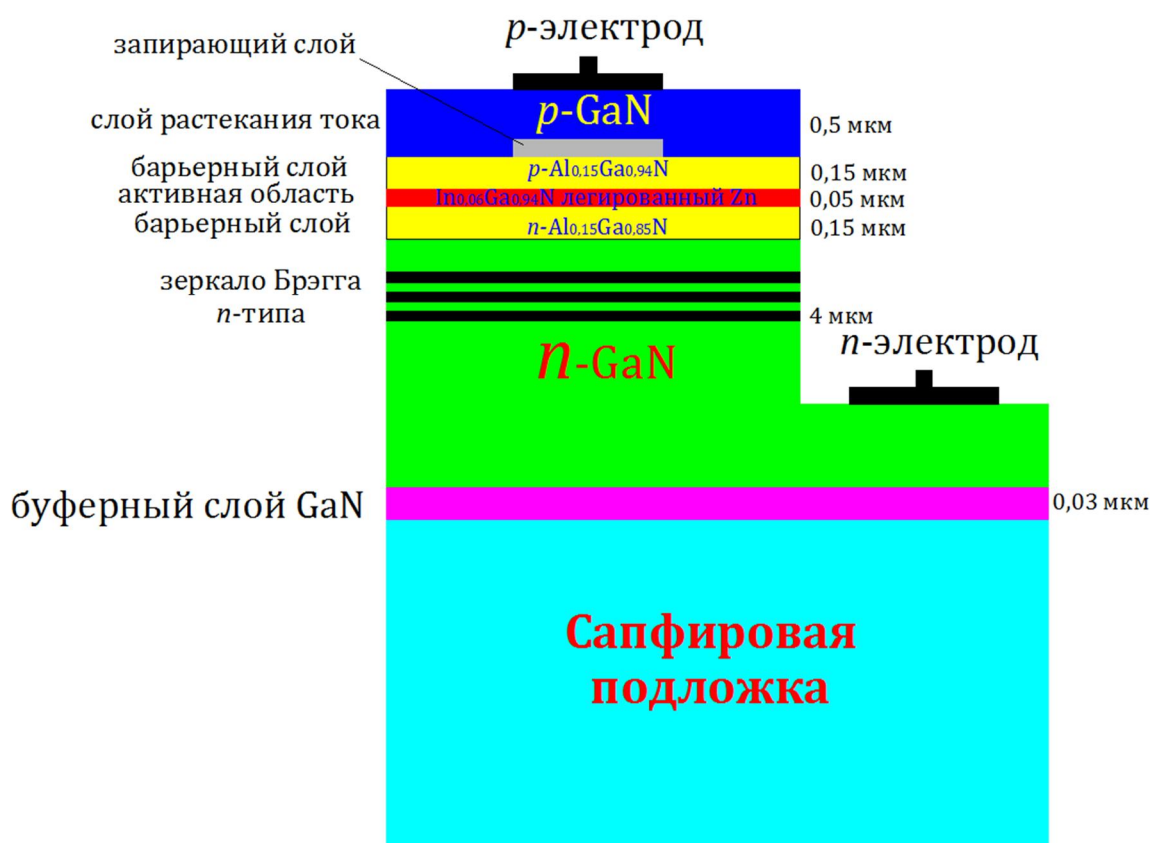
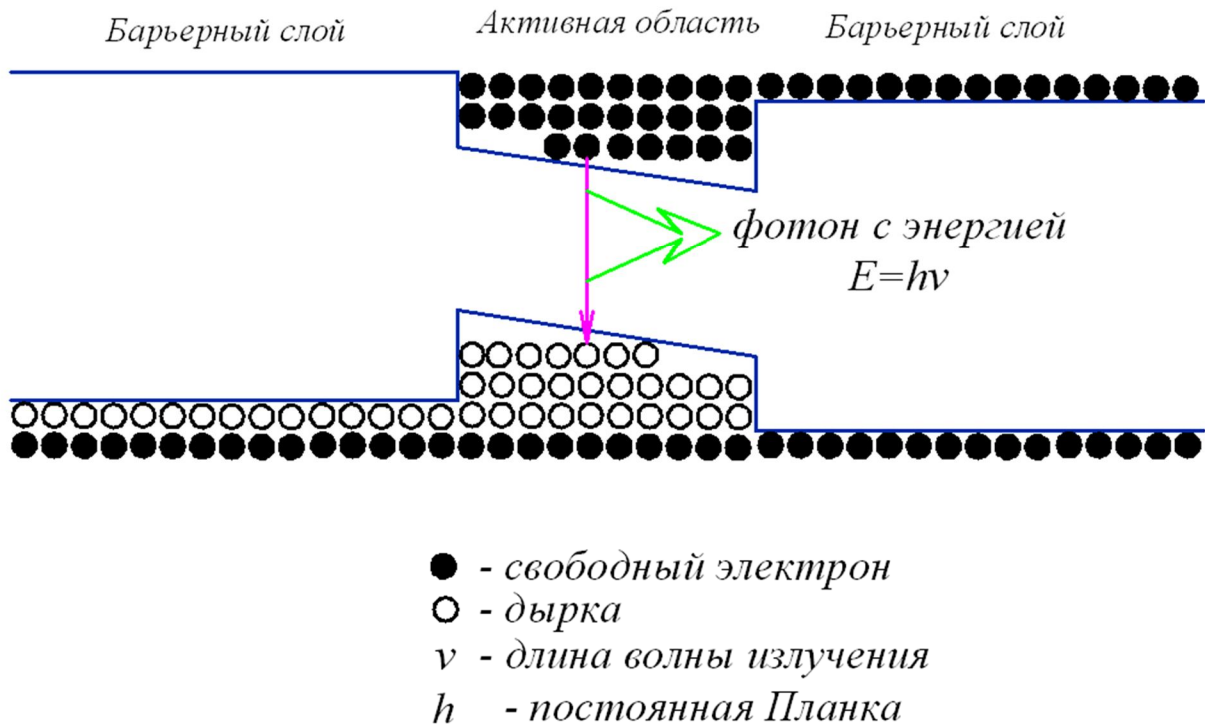


Рис.2 Структура кристалла светодиода, излучающего свет в синей части видимого спектра (длина волны 470 нм).

В данном случае кристалл светодиода представляет собой двойную гетероструктуру, состоящую из активной области (выделена красным на рис.2) и двух пассивных барьерных слоев (желтый цвет на рис.2). Двойные гетероструктуры создаются на основе трехмерной активной области (обычно

маломощные светодиоды) или активной области в виде квантовых ям (светодиоды средней и большой мощности). На рисунке 3 показано распределение носителей заряда (электронов и дырок) в *p-n-гетеропереходе* для двойной гетероструктуры.



*Рис.3 Распределение носителей заряда (электронов и дырок) в *p-n-гетеропереходе* при прямом смещении*

Материалы подбираются таким образом, чтобы в активной области запрещенная зона полупроводников была меньше, чем в барьерных слоях. Основная рекомбинация электронов и дырок с образованием фотонов происходит в активной области. Энергия фотонов, а следовательно длина волны излучения определяется шириной запрещенной зоны полупроводников в активной области. Рекомбинация носителей заряда (электронов и дырок) в области барьерных слоев происходит, как правило, без образования фотонов и приводит к разогреву кристалла светодиода. Попадание носителей заряда из активной области в область барьерных слоев возможно при сообщении дополнительной энергии носителям заряда, например, разогрев материала или увеличение напряжения, приложенного к светодиоду. Барьерные слои благодаря своей структуре прозрачны для излучаемых активной областью фотонов. Интенсивность излучения или внутренний квантовый выход светодиода зависит от многих факторов, основными из которых являются состав материалов кристалла, размеры активной области и барьерных слоев, степень легирования кристалла в

различных слоях, наличие дефектов кристаллической структуры и температура области *p-n-перехода*. Запирающий слой (серый цвет на рис. 2) и слой растекания тока (синий цвет) предназначены для увеличения площади активной области, где происходит рекомбинация электронов и «дырок», и снижения активности этого процесса под непрозрачным для выделяемых фотонов электродом. Зеркала Брэгга преломляют световой поток от активной области таким образом, чтобы перенаправить его вверх на рисунке, куда светит светодиод. Подложка изолирует области *p-n-перехода* кристалла, а буферный слой (или зародышевый слой) обеспечивает согласование кристаллических решеток материалов кристалла для снижения количества дефектов (точечных дефектов, дислокаций, микротрещин) в светодиодной гетероструктуре, приводящих к существенному снижению внутреннего квантового выхода светодиода. Исходя из структуры кристалла, его рабочая температура будет определяться нагревом активной области, поэтому рассмотрим один из основных факторов, определяющих температурный режим активной области (иногда используют термин «температура носителей заряда»). В первую очередь необходимо понимать, что рекомбинация электронов и дырок не всегда заканчивается образованием фотонов. Из-за наличия дефектов (их появление неизбежно при эпитаксиальном выращивании кристалла) и других факторов часть электронов и дырок рекомбинирует с образованием так называемых «фононов» и называется *безизлучательной*. Фонон характеризует порцию энергии, которая поглощается кристаллической решеткой материалов и приводит к ее колебаниям. На рис.4 изображена рекомбинация пары «электрон-дырка» с выделением фотона, а на рис.5 рекомбинация приводит к дополнительному разогреву материала (колебаниям кристаллической решетки).

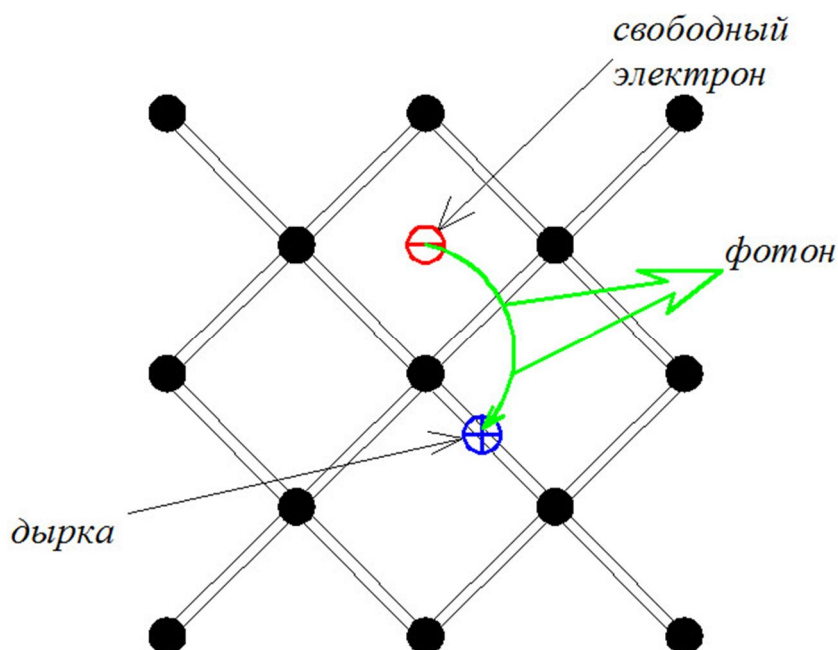


Рис.4 Излучательная рекомбинация электронно-дырочной пары с возбуждением фотона

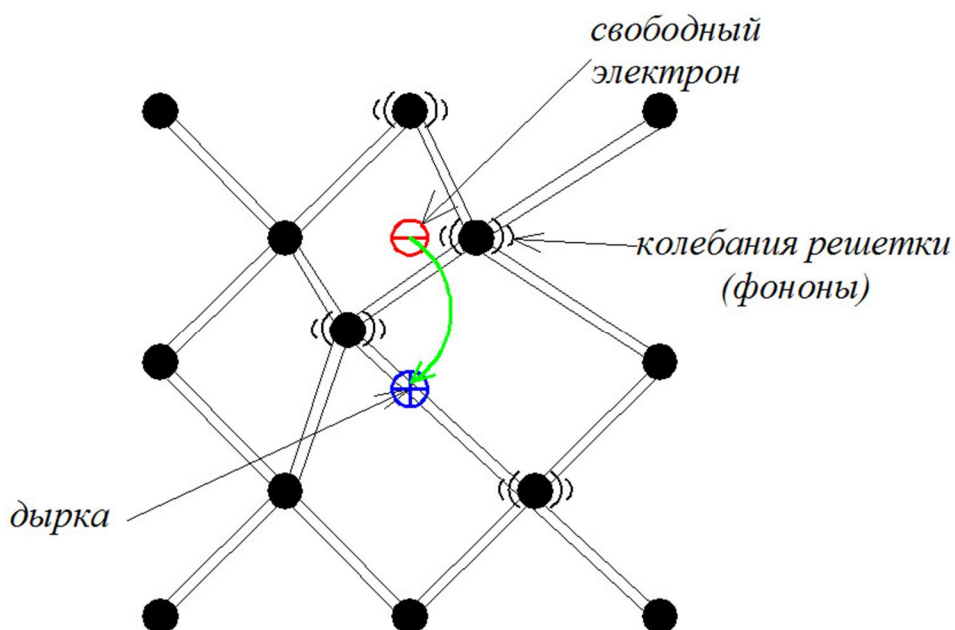


Рис.5 Безизлучательная рекомбинация электронно-дырочной пары с выделением энергии, которая передается фононам и приводит к возрастанию температуры материала

Особенностью процесса образования фононов является зависимость его от температуры. При возрастании температуры количество пар «электрон-дырка», рекомбинирующих с образованием фононов возрастает, что приводит к уменьшению светового потока светодиода и увеличивает температуру *p-n-перехода*. Таким образом, данный процесс может носить лавинный характер и приведет в конечном итоге к необратимому изменению структуры кристалла светодиода и потере им своих свойств. *Поэтому очень важно знать зависимость температуры активной области от тока, протекающего через светодиод и от температуры окружающей среды.*

Корпуса светодиодов, как правило, выполняются из специального термостойкого материала и предназначены для обеспечения защиты кристаллов от воздействия внешней среды, кроме того в некоторых случаях корпус служит для крепления светодиодов на плате или корпусе светильника. *Материал корпусов в общем случае существенно увеличивает тепловое сопротивление между активной областью и окружающей средой. В тоже время высокая температура эксплуатации светодиода может привести к разрушению материала корпуса.*

Важно понимать, что постоянное появление новых светодиодов с более высокими характеристиками по светоотдаче влечет за собой увеличение мощности светодиода и возрастание выделяемого *p-n-переходом* тепла, что требует разработки новых способов соблюдения теплового режима за счет модернизации корпусов мощных светодиодов. В настоящее время существует несколько способов снижения теплового сопротивления между *p-n-переходом* и окружающей средой, один из которых применение в составе корпуса светодиода алюминиевого или медного теплоотвода (радиатора) как показано на рисунке 6, расположенного непосредственно под кристаллом и имеющего контакт с платой через пайку или термоматериал (например, термопасту).

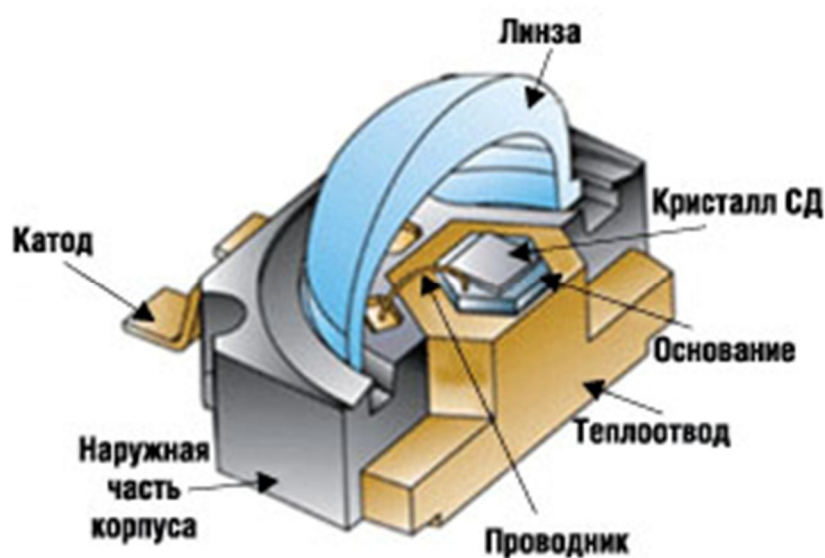


Рис.6 Конструкция мощного (от 0,5 Вт) светодиода

Необходимо учитывать, что обязательного применения таких способов требуют светодиоды мощностью от 0,5 Вт и выше. Маломощные или сверхяркие светодиоды мощностью до 0,5 Вт позволяют решить задачу отвода тепла от активной области через корпус другими способами, например через верхнюю часть светодиода в планарном исполнении (например, SMD5050 или SMD 3528). *Однако некоторые производители светодиодных осветительных приборов при использовании большого количества таких светодиодов в мощных светильниках не уделяют внимание тому факту, что использование полностью пластикового и герметичного корпуса светильника без дополнительного алюминиевого или металлического радиатора, имеющего непосредственный контакт с окружающей средой, может существенно сократить срок службы*

светодиода за счет повышения температуры полости внутри светильника и привести к его деградации и снижению светового потока если не сразу, то в течение 1-2 лет эксплуатации. Тем более, это актуально для условий эксплуатации с повышенной температурой окружающей среды, к которым относится и птицеводство, где температура внутри помещений для содержания и выращивания птицы может достигать $+35^{\circ}\text{C}$ - $+45^{\circ}\text{C}$.

Контактная группа служит для электрической связи между внешним источником питания и электродами, размещенными на кристалле светодиода. Как правило, соединение контактов и элементов внешней электрической схемой происходит методом пайки. Здесь необходимо отметить, что контактная группа может стать источником дополнительного нагрева в случае использования мощных светодиодов, у которых достаточно большие рабочие токи. Гораздо менее этот эффект заметен при использовании маломощных светодиодов. *В тоже время, при измерении рабочей температуры активной области светодиода, нельзя использовать непосредственно значения, полученные на «ножках» светодиода, так как соединение самой контактной группы и электродов на кристалле происходит с использованием, как правило, тонкой проволоки из металлов, обладающих малым электрическим сопротивлением и низкой химической активностью (для предотвращения попадания примесей в кристалл светодиода), например, золота.* В таких случаях использование контактной группы в качестве радиатора для отвода тепла от активной области неэффективно, а разница температур на «ножке» светодиода и областью *p-n-перехода* может достигать достаточно больших значений.

Люминофоры. Человеческий глаз воспринимает свет как белый, если все три группы рецепторов (зеленая, красная и синяя колбочка) его сетчатки возбуждены в определенном соотношении. Активная область светодиода, состоящая из твердого раствора определенных материалов с определенной шириной запрещенной зоны, может возбуждать фотоны одной длины волны. На практике спектр излучения светодиода имеет составляющие и около значения основной длины волны, это связано с наличием неизбежных дефектов кристаллической решетки материалов, а так же особенностями излучательной и безизлучательной рекомбинации пар «электрон-дырка». Такое «размытие спектра» невелико и не оказывает существенного влияния на восприятие света от светодиода живыми организмами. Как правило, его не учитывают при создании светодиодов для нужд индикации и освещения. Более жесткие требования к спектру излучения предъявляются только при производстве лазеров на основе полупроводниковых структур. Таким

образом, для того, чтобы светодиод излучал белый свет необходимы дополнительные технические решения. Сразу определимся, что создавать непрерывный спектр во всей полосе видимого диапазона не требуется, достаточно использовать излучение несколько участков видимого спектра для восприятия сетчаткой глаза суммарного излучения как белого света. Основными способами получения излучений нескольких длин волн для формирования при смешении белого света являются:

- использование нескольких светодиодов или кристаллов в одном светодиоде, излучающих на различных длинах волн;

- использование специальных материалов (люминофоров), позволяющих преобразовать часть излучения определенной длины волны в излучение другой (других) длины волны.

Первый способ в настоящее время менее распространен, чем второй. Недостатком одновременного использования кристаллов или светодиодов различной длины волны для создания спектра белого света, воспринимаемого сетчаткой глаза (например, синего, красного и зеленого) являются жесткие требования по соотношению световых потоков с различной длиной волны. Для этого необходимо точно согласовать токи и напряжения на светодиодах (кристаллах), что достаточно трудно соблюдать с течением времени.

Второй способ позволяет получить самые распространенные источники белого света на основе преобразователей длины волны излучения. Он заключается в использовании излучения кристаллов светодиодов для возбуждения одного или нескольких люминофоров. В общем случае преобразователи длины волны излучения создаются на основе: люминофоров, полупроводников и красителей. Самыми распространенными являются люминофоры, так как их производство относительно недорого в отличие от полупроводников, а стабильность параметров с течением времени и высокий квантовый выход излучения лучше, чем у красителей, которые представляют собой органические соединения. Люминофоры состоят из неорганических материалов, легированных оптически активными элементами. Наиболее распространены в настоящее время люминофоры на основе гранатов, одним из представителей которых является алюмоиттриевый гранат (АИГ-УАГ) с химической формулой $Y_3Al_5O_{12}$. Альтернативой люминофорам на основе УАГ являются люминофоры на основе алюмотербиевых гранатов (ТАГ) с химической формулой $Tb_3Al_5O_{12}$.

В общем случае получение белого света возможно на основе двухцветного источника излучения, когда используется непосредственно излучение кристалла светодиода (обычно синего свечения – длина волны 450-470 нм) и излучение люминофора в желтой и зеленой области видимого спектра с максимумом на длине волны 555 нм. Другим способом получения белого света являются трех- и четырехцветные источники излучения. В таком случае применяются люминофоры, излучающие в возбужденном состоянии свет на различных длинах волн.

Важно понимать, что применение нескольких люминофоров в светодиоде существенно снижает его светоотдачу или световой поток, а следовательно энергоэффективность светодиодного светильника в целом. В тоже время у трех - и четырехцветных источников белого цвета гораздо выше индекс цветопередачи, что необходимо, например, в интерьерной подсветке. Для применения светодиодов в сельском хозяйстве, за исключением растениеводства, индекс цветопередачи не играет существенной роли. Для освещения помещений с птицей и животными вполне достаточно двухцветных источников белого света с индексом цветопередачи 70-75 (100 - индекс цветопередачи эталонного источника белого света), что сравнимо с индексом цветопередачи люминесцентных ламп. Индекс цветопередачи характеризует способность источника белого света передавать все цвета окружающих объектов. Некоторые производители светодиодного оборудования заявляют максимальные характеристики по световому потоку (светоотдаче) и индексу цветопередачи, хотя эти две характеристики в общем случае относятся, как правило, к кристаллу светодиода (световой поток или светоотдача) и люминофорам (индекс цветопередачи) и не могут одновременно иметь максимальные значения.

Как правило, люминофоры расположены в верхней части корпуса светодиода над кристаллом, как показано на рис.7

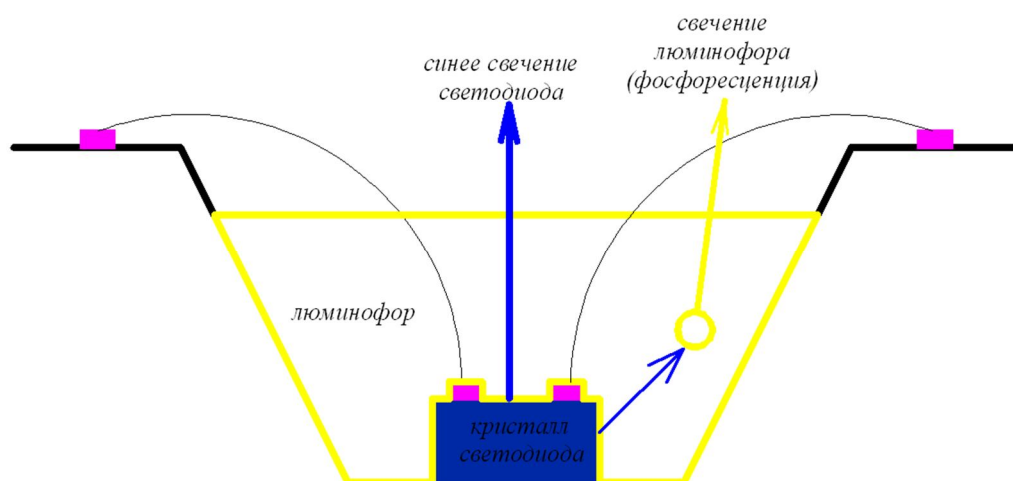


Рис.7 Излучение люминофора и синее свечение кристалла на основе InGaN

Спектр излучения светодиода белого свечения, состоящий из синей полосы излучения полупроводникового кристалла и полосы люминофора, расположенной в длинноволновой области, представлен на рисунке 8.

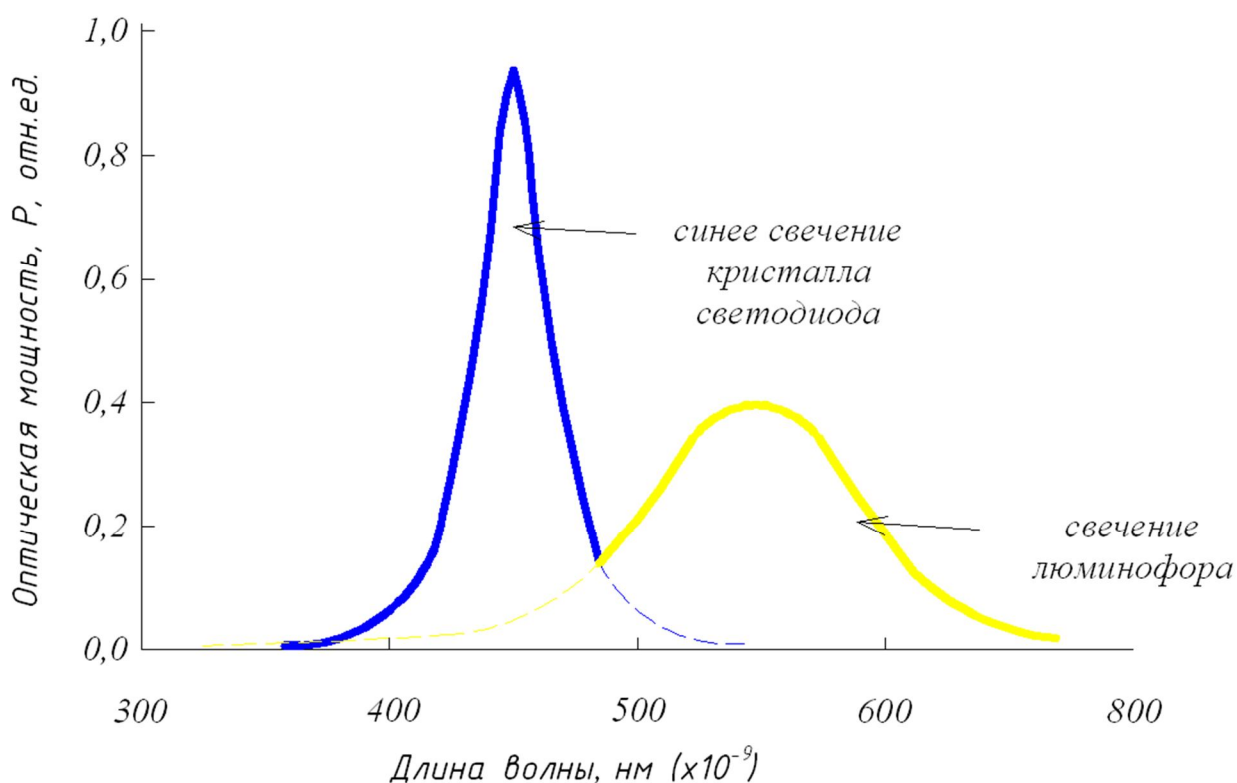


Рис.8 Спектр излучения светодиода белого света на основе люминофора YAG, изготовленного Nichia Chemical Industries Corporation (Anan, Tokushima, Japan)

Толщина слоя и концентрация люминофора, а также его состав определяют соотношение интенсивностей двух типов излучения, что позволяет оптимизировать такие характеристики светодиода белого света, как световая эффективность и индекс цветопередачи. Улучшить цветопередачу двухцветного светодиода белого света можно путем смещения максимума спектра излучения люминофора в длинноволновую область. Например, если максимум спектра люминофора на рисунке 8 сдвинуть с 555 нм до 655 нм, свечение светодиода будет характеризоваться более низкой цветовой температурой. При синем свечении кристалла светодиода с максимумом на длине волны 460 нм и люминофора на длине волны 655 нм, цветовая температура светодиода равняется примерно 2 800 К - 3 000 К. Белый свет при значениях цветовой температуры от 2 500 К до 3 500 К

называют теплым белым. Он примерно соответствует излучению Солнца в ясную погоду на рассвете и закате (около $3\ 100\ K$) или через час после восхода ($3\ 500\ K - 3\ 700\ K$). Значения цветовой температуры солнечного излучения изменяются в зависимости от положения Солнца на небе (максимальная цветовая температура будет в период зенита в диапазоне от $6\ 500\ K$ до $10\ 000\ K$) и облачности. На первый взгляд, сложно объединить два, казалось бы, разных понятия, свет и температуру. Однако легко представить эту связь на примере куска металла, который постепенно разогревают. В процессе повышения температуры металла, его цвет будет меняться от тускло красного до белого с синевой при больших значениях собственной температуры. Более точным эталоном цветовой температуры считается спектр излучения абсолютно черного тела, определяемый только одним параметром – собственной температурой тела. На рисунке 9 представлены спектральные распределения интенсивности излучения абсолютно черного тела по длинам волн, измеренные при разных температурах.

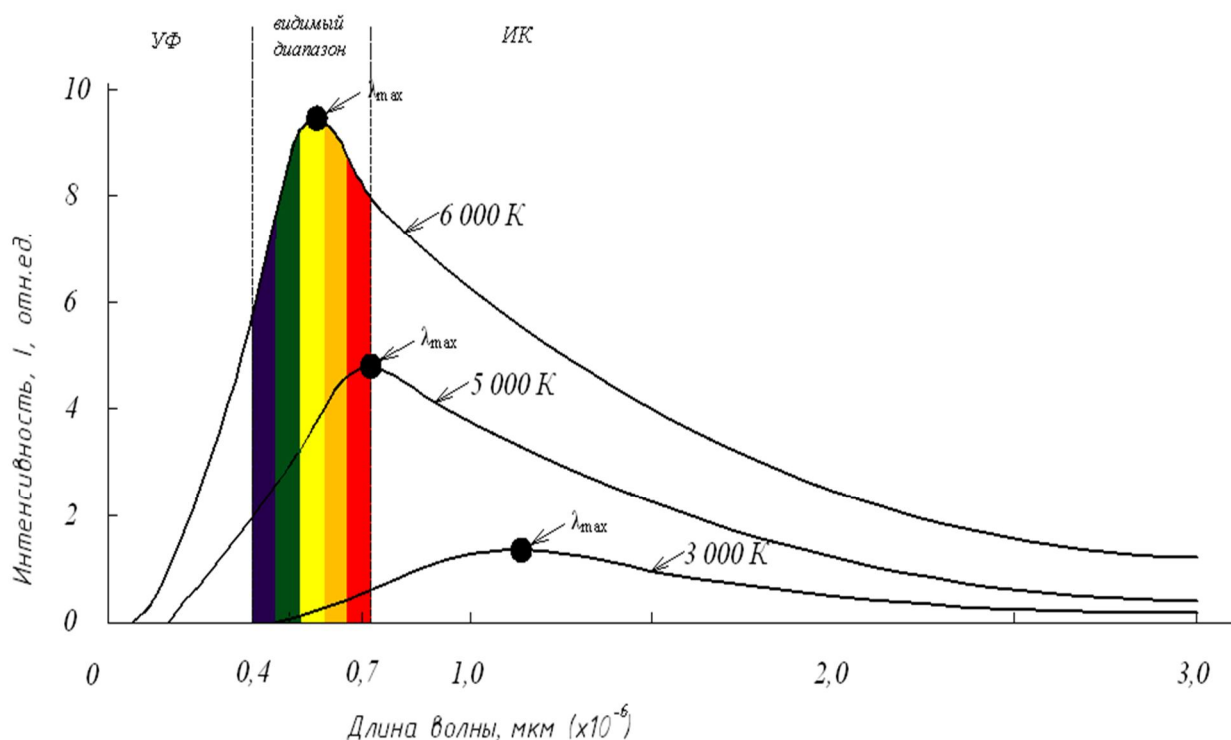


Рис.9 Спектральные распределения интенсивности излучения абсолютно черного тела по длинам волн, измеренные при разных температурах. При повышении температуры черного тела максимум интенсивности сдвигается в сторону более коротких волн

На основании этих данных можно выявить существенную особенность излучения при различных значениях цветовой температуры. Она состоит в том, что уменьшение цветовой температуры осуществляется смещением максимума излучения источника белого света из диапазона видимого спектра в длинноволновую область, а это в свою очередь говорит о том, что светодиоды белого света с цветовой температурой 2 800 К – 3 500 К обладают меньшей светоотдачей или меньшим световым потоком, чем светодиоды температурой 6 500 К – 10 000 К при одинаковом типе кристалла и значении рабочего тока. Эта разница может достигать 10 – 15 % и должна обязательно учитываться при проектировании систем светодиодного освещения для сельского хозяйства.

Таким образом, при проектировании и производстве светодиодных систем освещения, в том числе и для сельского хозяйства, необходимо учитывать множество факторов, связанных как с эксплуатацией светодиодов, так и системы освещения в целом. В данной статье не рассматриваются вопросы проектирования и производства блоков питания (преобразователей напряжения) и системы управления освещением, которые также являются важными и влияют на эффективность применения светодиодов в качестве источников света. Характеристики и особенности применения схем питания и управления светодиодами будут рассмотрены в следующих статьях.

В заключении хотелось бы отметить, что строение и характеристики светодиодов в настоящей статье рассмотрены достаточно обще, некоторые процессы, происходящие на уровне элементарных частиц, не могут быть объяснены с точки зрения классической механики и требуют использования понятий квантовой механики и других современных физических теорий. Для примера можно привести такое явление, как туннелирование электронов или туннельный эффект. В настоящее время этот эффект активно используется, например, в туннельных диодах. В тоже время его с точки зрения классической механики можно сравнить с следующим примером: представьте себе пятиэтажный дом высотой 18-20 метров, соберите во дворе этого дома достаточно большое количество людей, а теперь оцените возможность или вероятность того, что любой человек из них может без применения каких-либо специальных средств, только за счет мускульной силы, подпрыгнув, оказаться на крыше здания. (Не рассматриваем фантастические варианты, типа человека-паука). С точки зрения квантовой механики такое не только возможно, но и происходит постоянно на уровне микромира элементарных частиц.