

ТЕМА_13_СВЕТОДИОДНО_ОСВЕТЛЕНИЕ

Тема 15. Съвременни светлинни източници. Принцип на действие, характеристики. Приложения.

1. Общи положения

Известно е, че осветлението е:

- ергономичен фактор – доказано е повишаването на производителността на труда и качеството на продукцията при подобряване на количествените и качествените показатели на осветителните уредби;
- фактор за безопасност и здраве (санитарно хигиенен и биологичен фактор) - здравословни и безопасни условия на труд; намаляване броят на злополуките;
- социален фактор – с нарастването на възрастта нуждата от осветление се увеличава.

През последните години в рамките на Европейския съюз годишната консумация на електрическа енергия за осветление е около 250 милиарда kWh. В Република България около 10 % от общия електроенергиен разход е за осветление (за русенските предприятия средно около 11 %; в шивашките предприятия понякога надминава 30 %).

Таблица 15.1. Енергийна ефективност на светлинните източници (оценена чрез светлинния добив).

Светлинен източник	Светлинен добив, η , lm/W
Нажежаема лампа	6 ÷ 23
Криптонова нажежаема лампа	7 ÷ 26
Халогенна нажежаема лампа	9 ÷ 35
Тръбна луминесцентна лампа	50 ÷ 80
Компактна луминесцентна лампа	~50
Живачна лампа	~60
Метал халогенна лампа	70 ÷ 95
Натриева лампа високо налягане	65 ÷ 115
Натриева лампа ниско налягане	150÷200
Безелектродна високочестотна лампа	50 ÷ 80
Ксенонова лампа	~ 25

Осветителните уредби изискват влагането на високи еднократни разходи и представляват голям потребител на електрическа енергия. Ето защо от гледна точка на икономическа ефективност и опазване на околната среда все по-голямо значение придобива енергийната ефективност на различните типове светлинни източници, използвани в промишлеността и в бита.

2. Използване на мощни бели светодиоди в осветителната техника.

Анализ на състоянието на проблема

Светодиодите с висока мощност имат много предимства в сравнение с други светлинни източници. Светлинната ефективност на най-добрите светодиоди надвишава 100 лумена на ват (lm/W); ефективността на съвременните светодиоди е по-добра в сравнение с тази на КФЛ (компактни флуоресцентни лампи) повече от три пъти. По последни данни светлинната ефективност на светодиодите стига до над 200 лумена на ват (lm/W). Светлинните характеристики на светодиодите могат да бъдат избрани в

зависимост от предпочитанията на потребителите. Корелираната цветна температура може да се изменя в широк диапазон от 3500 K + 5000 K чак до 10000 K (топло бяло, неутрално бяло и студено бяло). Коефициентът на цветопрераждане за светлината на светодиодите обикновено е над 80.

Дължината на живота на светодиодите е забележителна. Светодиодите от осветителния клас не се развалят внезапно, както това става при лампите. Напротив, те могат да светят най-малко 50000 часа преди изходящия светлинен поток да намалее до 70% от първоначалната стойност. Това е еквивалентно на повече от 6 години непрекъсната работа! Обаче в повечето случаи осветлението се гаси редовно. Периодите на изключване могат да увеличат живота на светодиода повече от три пъти. Приложението на светодиодите в осветителната техника намалява вредното ѝ влияние върху околната среда – не се използва живак при производството и работата, по-малко е замърсяването от електроцентралите, по-малко е общото количество отпадъци.

Осветителната апаратура на базата на светодиоди притежава допълнителни предимства – при включване не е нужно допълнително време за достигане на номинален светлинен поток (за разлика от КФЛ, например); времето на живот на осветително оборудване не зависи от броя на циклите включване/ изключване (в противоположност на КФЛ); чрез подходящо регулиране на работата на светодиодите светлинният поток на осветителя може да се мени в много широк диапазон.

Конструкцията на светодиодите позволява голяма свобода и вариативност на дизайнерските решения, като същевременно дава възможност за по-малки загуби на светлинния поток и повишаване на ефективността на осветителните тела.



**Кралската шведска академия
на науките присъди
Нобеловата награда за физика
за 2014 година съвместно на
японците Исаму Акасаки,
Хироши Амано и американеца
Шуджи Накамура.**

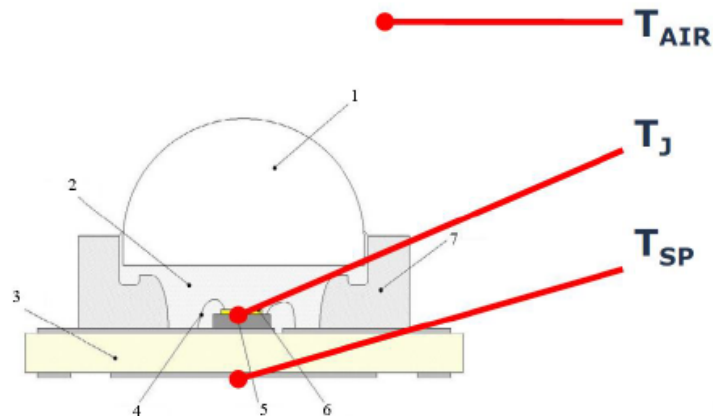


Наградата бе присъдена за създаването на сините светодиоди и синия полупроводников лазер.

Както заявиха членовете на Шведската кралска академия на науките: „тази година наградата е повече за „изобретение“, отколкото за „откритие“. Но това е изобретение, което би направило Алфред Нобел щастлив“.

3. Особенности при използването на мощни светодиоди.

Важно е да се отбележи, че ефективността и дълготрайността на осветление, реализирано на базата на мощни светодиоди, зависят най-силно от термичните натоварвания, на които са подложени светодиодите по време на експлоатацията. Част от фирмите предоставят данни за светодиодите при температура на р-п прехода 25°C – което е практически непостижимо по време на експлоатация. Повишаването на температурата на р-п прехода води до деградация на светодиодите и до влошаване на светлинния добив. При експлоатация на светодиодите отсъстват тотални откази в светенето, характерни за другите типове светлинни източници, а основните проблеми при експлоатация са свързани с отвеждането на топлинния поток, генериран в чипа на светодиода.



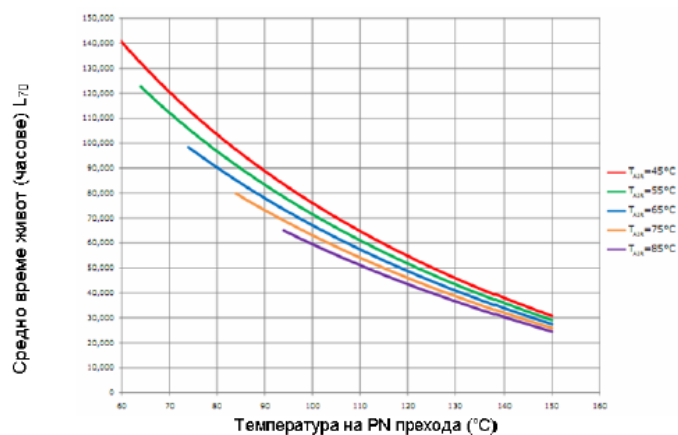
Фиг. 15.1. Схематичен разрез на мощен светодиодилен модул: 1- леща; 2- капсулираща смола; 3- радиатор; 4- свързващ проводник; 5- подложка на чипа; 6- светодиодилен чип; 7- рефлектор; T_{AIR} – температура на въздуха; T_J – температура на p-n прехода; T_{SP} – температура на спойката.

Механизмът на топлоотвеждане може да бъде само чрез кондуктивен топлообмен от чипа към радиатора за охлаждане. Радиационен и конвективен топлообмен от този тип светлинни източници към околната среда практически отсъства. Това поставя акцента при проектирането на осветителни тела, изградени на базата на мощни светодиоди, върху:

- правилния избор на радиатор за осветителното тяло;
- подходящо разположение и монтаж на светодиодите върху него;
- избор на режими на работа на светодиодите в зависимост от промяната на условията на експлоатация.

На фиг. 15.1 е показан схематичен разрез на мощен светодиодилен модул и точките, в които стойностите на температурите са важни за надеждното функциониране на светлинния източник.

Както може да се види от данните на фиг. 15.2, температурата на p-n прехода и температурата на околната среда оказват голямо влияние върху експлоатационните характеристики на светодиодите.



Фиг.15.2. Зависимост на времето на живот на светодиода от температурата на PN прехода и от температурата на околната среда T_{AIR} .

При проектирането на електронни системи за оценяване на термичното натоварване на електронните компоненти се въвежда величината термично (топлинно) съпротивление. По пътя на топлинния поток термичното съпротивление на даден елемент дава пада (изменението) на температурата върху елемента на единица електрична мощност, преминаваща през него в $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (K/W). На фиг. 15.3 е показан модел на термичните съпротивления в топлинната верига: чип на светодиода – площадка за запояване – радиатор – околна среда за един светодиод.

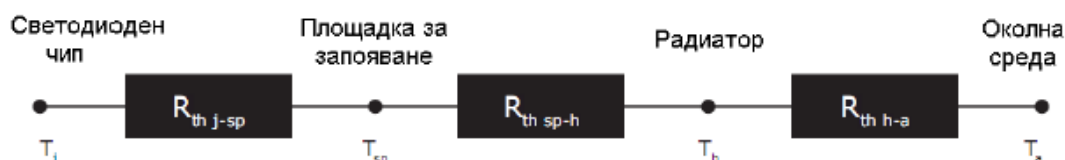
Например температурната разлика между температурата на p-n прехода T_j и температурата в площадката на запояване на светодиода T_{sp} се дава с израз:

$$T_j - T_{sp} = R_{th\ j-sp} * P_{LED}, \text{ където}$$

P_{LED} е електричната мощност, разсейвана от светодиода ($P_{LED} = I_F * U_F$).

I_F – ток през светодиода; U_F – пад на напрежение върху светодиода.

(junction - p-n преход; solder point – точка на запояване; heat sink - система (радиатор) за охлаждане; ambient – околна среда (най-често въздух)).



Фиг. 15.3. Модел на термичните съпротивления в топлинна верига на светодиод: $R_{th\ j-sp}$ – термично съпротивление между p-n прехода и площадката за запояване; $R_{th\ sp-h}$ – термично съпротивление между площадката за запояване и радиатора; $R_{th\ h-a}$ – термично съпротивление между радиатора и околната среда; T_j – температура на p-n прехода; T_{sp} – температура на площадката за запояване; T_h – температура на радиатора; T_a – температура на околната среда.

Термичен мениджмънт на осветително оборудване на базата на светодиоди

Както е известно, основните механизми на деструкция при светодиодите зависят силно от температура. Повишената температура на p-n прехода е причината за намаляване на светлинния добив и ускоряване на стареенето на чипа (полупроводниковия кристал). Максималната температура на p-n прехода за всяка производствена линия се посочва в техническата документация на изделието. Температурата на p-n прехода зависи главно от три параметъра: температурата на непосредствено обкръжаващата среда на светодиодите; термичния път между p-n прехода на светодиода и обкръжаващата среда и разсеяната електрична мощност върху светодиода.

За успешно термично проектиране много е важно да се спазват следните основни правила:

- Повишаване на топлинната проводимост между охлаждащия радиатор и светодиодите.
- Поддържане чист пътя на въздушния поток за осигуряване на естествена въздушна конвекция.
- Правилен избор на радиатор в зависимост от условията на работа.

В повечето случаи мощните светодиоди се монтират върху печатни платки с метална сърцевина (MCPCB), които се прикрепят към охлаждащ радиатор. Топлината, отделена от р-п прехода на светодиода, преминава през MCPCB до радиатора в резултат на топлопроводност. Радиаторът разсейва топлината в околната среда предимно чрез конвекция.

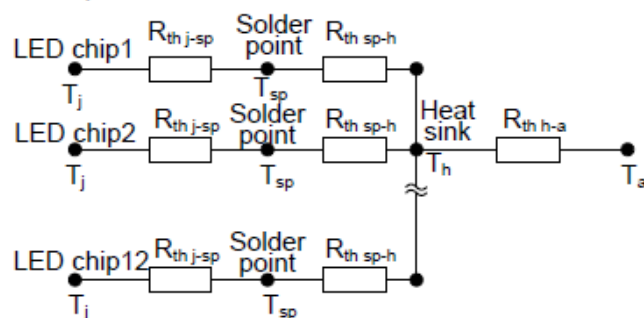
Пълното топлинно съпротивление представлява последователно свързани съпротивления от р-п прехода до спойката ($R_{th\ j-sp}$), от спойката до радиатора ($R_{th\ sp-h}$) и от радиатора до обкръжаващата среда ($R_{th\ h-a}$):

$$R_{th\ j-a} = R_{th\ j-sp} + R_{th\ sp-h} + R_{th\ h-a} \quad (15.1)$$

Топлоотдаването непосредствено от светодиодите към обкръжаващата среда е достатъчно малко и може да се пренебрегне при изчисленията.

Пример за проектиране на осветително тяло при отчитане на термичните натоварвания :

Изчисленията с цел управление на термичното натоварване на осветителната система са направени в съответствие с модела на термичните съпротивления за 12 броя XLamp светодиоди (Фиг. 15.4). В съответствие с модела на термичните съпротивления от фиг. 15.4 могат да бъдат изчислени стойностите на термичното съпротивление между радиатора и въздуха и да се избере подходящ радиатор.



Фиг. 15.4. Еквивалентна схема на термичните съпротивления за 12 броя XLamp светодиоди. $R_{th\ j-sp}$ - термично съпротивление между р-п прехода и спойката; $R_{th\ sp-h}$ - термично съпротивление между спойката и радиатора; $R_{th\ h-a}$ - термично съпротивление между радиатора и въздуха.

Подходящата стойност на $R_{th\ h-a}$ може да бъде изчислена по следния начин:

$$R_{th\ h-a} = [T_{j\ MAX} - T_{a\ max} - (R_{th\ j-sp} + R_{th\ sp-h}) * P_{LED}] / P_{tot}$$

$$T_{j\ MAX} = T_{a\ max} + (R_{th\ j-sp} + R_{th\ sp-h}) * P_{LED} + R_{th\ h-a} * P_{tot}, \quad (15.2)$$

където:

P_{LED} е мощността на един светодиоден чип;

$$P_{LED} = I_F * U_F = 0.35 * 3.3 = 1.155\ W;$$

P_{tot} е мощността на всички светодиоди;

$$P_{tot} = 12 * P_{LED} = 13.86\ W.$$

Подходящата стойност на $R_{th\ h-a}$ може да бъде изчислена по следния начин:

$$R_{th\ h-a} = [T_{j\ MAX} - T_{a\ max} - (R_{th\ j-sp} + R_{th\ sp-h}) * P_{LED}] / P_{tot} = [80 - 55 - 9 * 1.155] / 13.86 = 1.05^\circ C/W. \quad (15.3)$$

Избира се радиатор с термично съпротивление $1^\circ C/W$. Данните за $R_{th\ h-a}$ от каталог не са много надеждни и трябва да се проверят експериментално. Термичното съпротивление на радиатора зависи от разпределението на източниците на топлина (светодиодите) по неговата повърхност, от ориентацията на повърхността на радиатора – хоризонтално, вертикално или под друг ъгъл.

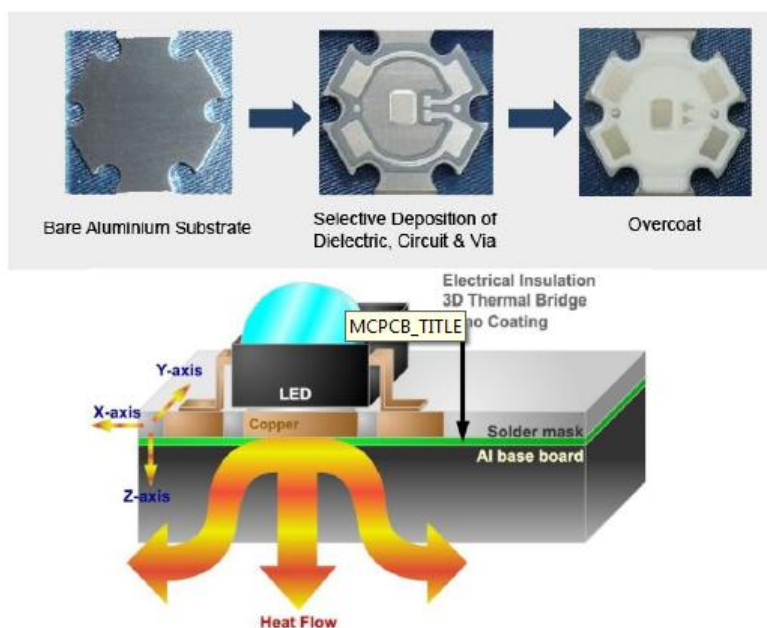
Ефективността на радиатора е функция на режимите на топло отдаване. Радиаторът може да разсейва мощност по три начина: чрез топлопроводимост (предаване на топлина от едно твърдо тяло към друго), чрез конвекция (предаване на топлина от едно твърдо тяло към движещ се флуид, при светодиодите флуидът най-често е въздух) или излъчване (предаване на топлина между две тела с различни повърхностни температури чрез електромагнитни вълни). Топлинното излъчване на радиатора е функция на оптичните свойства на повърхността му. Те са особено важни при по-високи температури. Боядисаната повърхност има по-голяма излъчвателна способност от чиста, не боядисана. Цветът на използваната боя не е толкова важен. Термичното съпротивление от плоска повърхност на радиатор, боядисан в полирано бяло, ще бъде само с около 3% по-голямо от това на същия радиатор, боядисан в матирано черно. За оребрени радиатори боядисването е по-малко ефективно, тъй като топлината, излъчвана от повечето ребра, ще попада върху съседни ребра, но, въпреки това, си заслужава. Анодизирането и ецването намалява термичното съпротивление.

Най-често отделните светодиоди се запояват върху платка с метална сърцевина (Metal Core Printed Circuit Board - MCPCB), която се отличава с малко термично съпротивление – фиг. 15.5 и фиг. 15.6.



Figure 3. MCPCB cross-sectional geometry (not to scale)

Фиг. 15. 5 Напречно сечение на платка с метална сърцевина (Metal Core Printed Circuit Board - MCPCB)

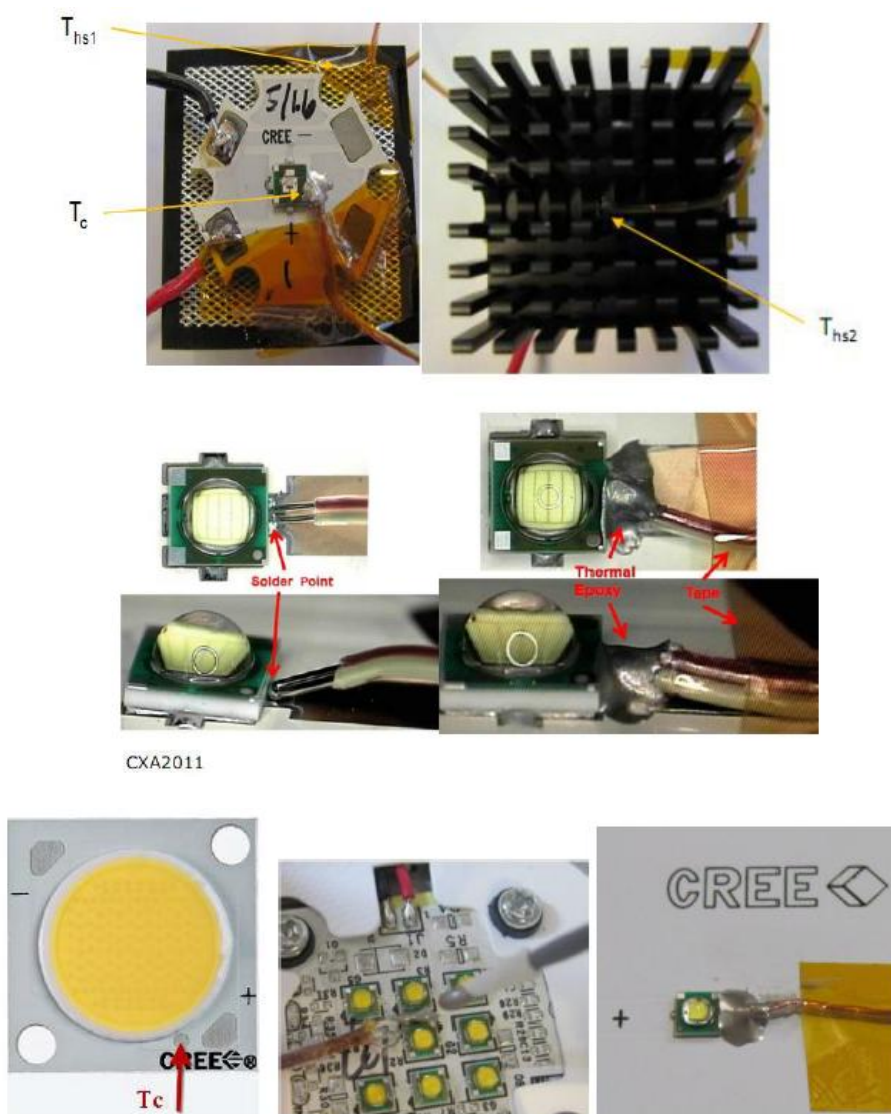


Фиг. 15. 6 Светодиод, запоян върху MCPCB

Методи за изследване на топлинното натоварване на светодиодиите при проектиране на осветително оборудване

- Изследване на топлинното натоварване на светодиоди с помощта на конвенционални измервания (с термодвойки).

Управлението на термичното натоварване (**най-често**) включва монтаж на светодиодите върху радиатор, монтаж на термодвойки и следене на температурата на спойката на светодиода по време на работа при различни условия – фиг. 15.7.



Tc – място за монтаж на термодвойка.

Фиг. 15. 7 Схема за монтиране на термодвойка за измерване на температурата на спойката на светодиода

$$R_{th\ j-a} = R_{th\ j-sp} + R_{th\ sp-a}. \quad (15.4)$$

Фиг. 15.8 Схема за определяне на топлинното натоварване на светодиоди

Температурата на р-п прехода не може да се измери директно, но тази стойност може да бъде изчислена, като се използват данни за температурата, измерена на изходите на светодиода, или в най-близката точка до извода на

пистата, върху която е запоен светодиода (T_{sp} или T_c).

След получаването на експериментални данни за температурата на спойката T_{sp} термичното натоварване на светодиода се оценява чрез пресмятане на температурата на р – п прехода T_j - зависимост (15. 5), фиг. 15.8.

$$T_j = T_{sp} + R_{th\ j-sp} \cdot P_{LED}. \quad (15.5)$$

Този метод за оценка на термичното натоварване на светодиодите по време на експлоатация на осветителното оборудване е прост, лесно се реализира и дава надеждни резултати, но притежава и съществени недостатъци.

Определянето на температурата на р-п прехода чрез измерване на температурата на платката (T_c) или на спойката (T_{sp}) с термодвойка има много неудобства – температурата може да се измери само в няколко точки; монтирането на термодвойки (особено върху малки обекти, каквито са светодиодите) е сложна задача, проводниците на термодвойката трябва да бъдат с диаметър, по-малък от 0,3 mm и т.н.

Поради това температурните режими могат да се следят за един – два светодиода и е почти невъзможно да се следи температурното разпределение по цялата площ на осветителното тяло.

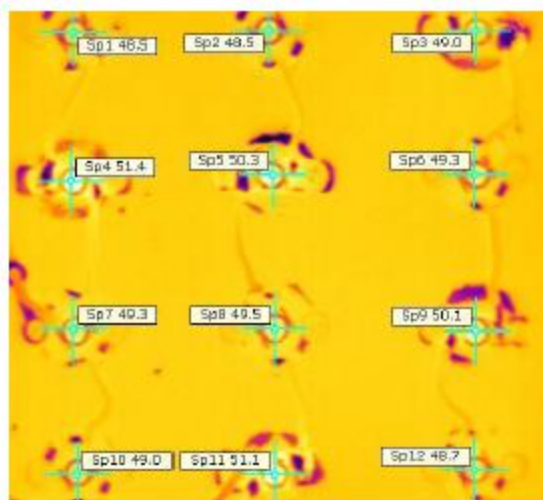
- Изследване на топлинното натоварване на светодиоди с помощта на инфрачервена термография.

Другият най-често използван метод за успешно определяне на топлинното натоварване на светодиодите е чрез използването на инфрачервена термография – фиг. 15.9. Тя позволява сравняването на термичните натоварвания на отделните светодиоди, разпределението на температурните полета по цялата площ на охлаждащия радиатор и намирането на оптимални конструктивни решения при разработването на нови осветителни тела.

Инфрачервената термография е широко използван метод за изследване на разнообразни термични процеси. Голямото предимство на тези методи на изследване е свързано с факта, че се извършват при условията на нормална работа на изследваните системи, без да се нарушава процеса на експлоатация.

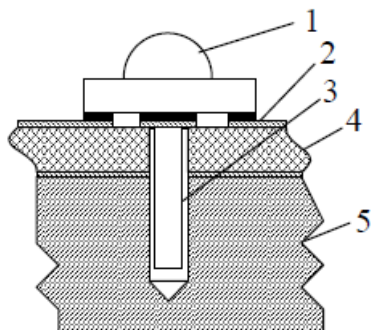
За да се получат коректни резултати при термографските измервания е необходимо да се отчете влиянието на различни фактори - лъчистата температура от околната среда; разстоянието между обекта и камерата; относителната влажност на въздуха; температурата на атмосферата и степента на чернота (emissivity) на изследвания обект. Инфрачервените камери могат да компенсират тези влияния, като се настройват съответните им параметри. Най-голямо е влиянието и най-сложно се определят степента на чернота на изследвания обект и лъчистата температура на околната среда.

Измерванията с помощта на инфрачервени (ИЧ) камери са полезни за получаване на бързо визуално представяне на топлинното разпределение върху цялата площ на светодиодното оборудване, за оценка на всички потенциални горещи точки и за други относителни сравнения.



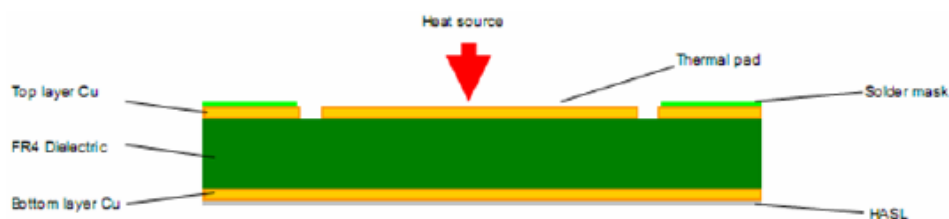
Фиг. 15.9 Изследване на топлинното натоварване на светодиоди в осветително тяло чрез инфрачервена термография

За намаляване на топлинното съпротивление между светодиода и охлаждащия радиатор се използват различни конструктивни решения – фиг. 15.10.

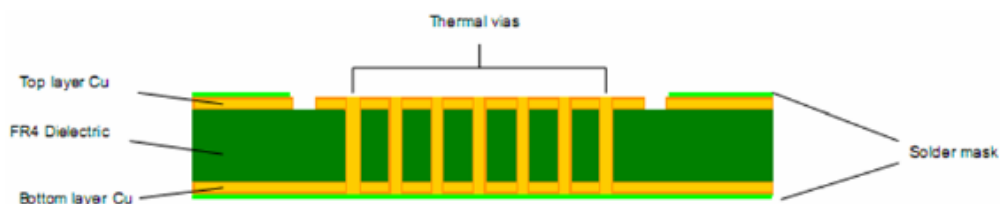


Фиг. 15.10 Топлоотвеждане при светодиод, монтиран на стандартна печатна платка с помощта на меден щифт, 1 – светодиод; 2 – медна писта от платката; 3 – меден щифт; 4 – стандартна печатна платка FR4; 5 – охлаждащ радиатор.

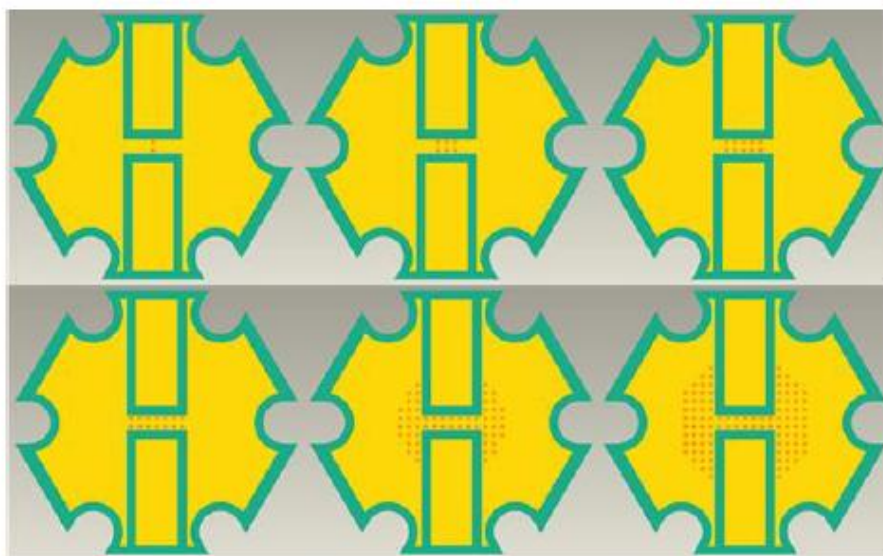
Тъй като термичното съпротивление на стандартна печатна платка – фиг. 15.11 е голямо, се търсят начини за редуцирането му. На фигури 15. 10, 15.12 и 15. 13 са показани някои от решенията.



Фиг. 15.11 Схема на сечението на стандартна печатна платка FR4



Фиг. 15.12 Метализирани отвори в стандартна печатна платка за намаляване на термичното ѝ съпротивление



FR-4 board with varying numbers of thermal vias (2, 6, 8, 14, 58, and 102)

Фиг. 15.13 Схеми на разположение на метализирани отвори в стандартна печатна платка за намаляване на термичното ѝ съпротивление

Във фирмените документации за експлоатационните характеристики на светодиодите подробно са представени параметрите зависещи от температурата. Някои от тях са обратими, като светлинен добив, цвят и напрежение на p-n прехода, докато други, като време на живот са необратими.

Светлинен добив

Повишаването на температурата на p-n прехода води до обратима деградация на светлинния добив. На фиг. 15.14а и 15.14б са представени зависимостите на относителния светлинен добив и цветността от температурата на p-n прехода за Cree XLamp XB-D светодиод. Светлинния добив е 100% при температура на p-n прехода 85°C.

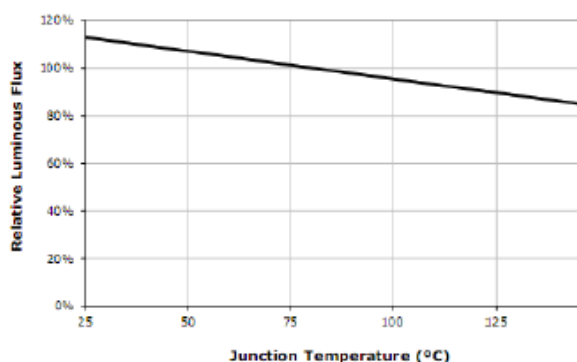


Figure 2: XLamp XB-D relative flux vs. steady-state junction temperature

Фиг. 15.14а. Зависимост на относителен светлинен добив от температурата на p-n прехода за Cree XLamp XB-D светодиод.

Relative Chromaticity

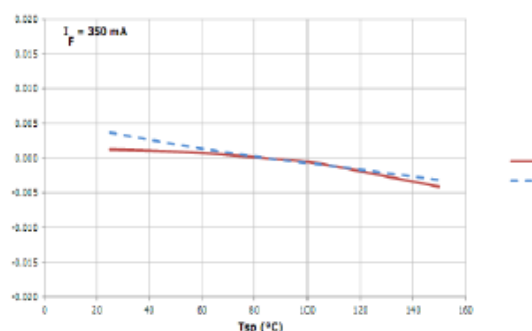


Figure 3: XLamp XB-D color shift vs. solder point temperature

Фиг. 15.14б. Зависимост на цветовите характеристики Cx и Cy от температурата.

Цветност (цветови характеристики)

С повишаването на температурата на p-n прехода се изменят цветовите характеристики при всички светодиоди. За качествените светодиоди тези изменения са малки.

Пад на напрежение

Напрежението в права посока намалява при увеличаване на температурата на p-n прехода. Типичните стойности на температурния коефициент на пада на напрежение в права посока са около $-3 \div -4 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$.

Надеждност

Надеждността на всеки светодиод е функция от температурата на p-n прехода. Високата температура скъсява живота на светодиода. Данните на производителите може да се използват за оценка на надеждността на проектираното осветително оборудване в зависимост от условията на експлоатация.

Генериране на топлина

Пропускането на ток в права посока през p-n прехода на светодиодите води до излъчвателна рекомбинация и генериране на светлина. За водещите производители при нормални условия на работа приблизително 50% до 60% от входящата мощност се отделя под формата на топлина, докато останалата част се превръща в светлина. При повишаване на температурата квантовата ефективност на излъчвателната рекомбинация намалява, което води до влошаване на светлинната ефективност – например 25% от входната мощност се превръща в светлина, а останалите 75% от енергията се отделят под формата на топлина. Това съотношение варира в зависимост от плътността на тока, температурата на p-n прехода, конструктивни особености и др. За оценка на термичното натоварване при проектиране на осветително оборудване би трябвало да се използва мощността, която се превръща в топлина, например:

$$P_{th}=k.U_f.I_f, \quad (15.6)$$

където:

P_{th} – генерирана термична мощност (W).

U_f – напрежението в права посока (V).

I_f – тока в права посока (A).

k – коефициент, който отчита каква част от входната мощност се превръща в топлина.

Поради сложността (в повечето случаи) при определянето на коефициента k , на практика за отчитане на топлинното натоварване най-често се използва цялата мощност, консумирана от светодиода.

Напрежението U_f и тока I_f в права посока може да бъдат измерени директно.

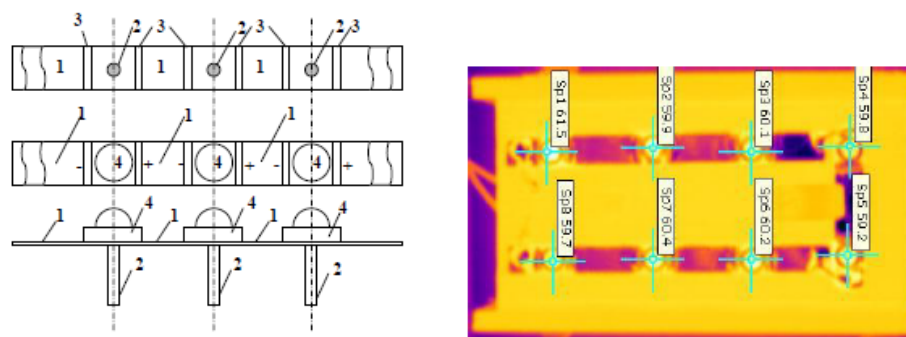
На Таблица 15.1 са представени типичните стойности на термичното съпротивление $R_{th\ j-sp}$ (от p-n прехода до точката на спояване) за различни серии на светодиоди на CREE XLamp.

Таблица 15.1. Типичните стойности на топлинно съпротивление $R_{th\ j-sp}$ (от p-n прехода до точката на спояване) за различни серии на светодиоди на CREE XLamp.

Color	Thermal Resistance (°C/W)													
	ML-B	ML-C	ML-E	MX-3	MX-6	XB-D	XM-L	XM-L EZW	XM-L HVW	XP-C	XP-E	XP-G	XT-E	XT-E HVW
White (cool, neutral, warm)	25	13	11	11	5	6.5	2.5	2.5	3.5	12	9	4	5	6.5

Table 1: Typical thermal resistance values for Cree XLamp white LEDs

На базата на различни видове платки се изработват твърди (както и гъвкави) светодиодни ленти за вграждане в осветителни тела с различно предназначение – фиг. 15.14.



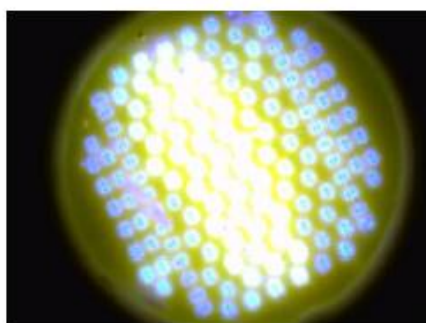
Фиг. 15.14 Осветително тяло на базата на твърди светодиодни ленти

Смята се, че конструкцията с много на брой единични светодиоди позволява постигането на по-добра светлинна ефективност (повече lm/W) поради повечето „фосфор“ и по-голямата площ. Въпреки това в последно време се забелязва много силна тенденция необходимата мощност и светлинен поток за дадено осветително тяло да се осигурява от съставна структура от много светодиоди, монтирани и капсуловани общо в един корпус върху метална (алуминиева основа). Размерите на основата на тези модули са обичайно 12/12, 19/19, 22/22 mm. На фиг. 15.15 са показани снимки на такива продукти на три фирми, а на фиг. 15.16 – снимки на два от модулите при 1 mA ток през тях. Предлагат се модули с най-различна мощност и големина на светлинния поток, покриващи практически всички нужди при изграждане на осветителни тела – от нощна лампа до лампи за улично осветление и мощни прожектори.

Голямо предимство при използването на тези модули е тяхната технологичност - лесният и бърз монтаж, свободата за избор на конструкторски решения, опростеното топлинно проектиране и изследване на топлинното натоварване в реални работни условия.



Фиг. 15.15 Снимки на съставни светодиодни модули



Фиг. 15.16а Снимка на Cree XLamp CXA2011 при 1mA ток

Фиг. 15.16б Снимка на Samsung LED, 805WHV0ED, 1mA ток

- Светлинният поток на светодиодното осветление зависи от много и разнообразни фактори, които включват тока през светодиодите и температурата на p-n преходите им.

Нужният светлинен поток = необходим светлинен поток / (Оптична ефективност * Термична ефективност)

- Топлинни загуби. Светлинният поток на светодиодите намалява при нарастване на температурата на p-n прехода (T_j). Каталогните данни за избран тип светодиоди включват зависимости за относителния светлинен добив в зависимост от температурата на p-n прехода (T_j). В зависимост от големината на тока през светодиода, околната температура и възможностите на избраната охлаждаща система да отвежда успешно генерираната топлина от зоната на p-n прехода може да се оцени каква ще бъде температурата на p-n прехода при различни условия на експлоатация и да се определи каква ще бъде промяната (намаляването) на светлинния поток на светодиодите при съответните работни условия.

- Определяне на големината на работния ток през светодиодите. Работният ток играе важна роля при определяне на ефективността и времето на живот на светодиодния осветител. Увеличаването на работния ток води до нарастване на светлинния поток от всеки светодиод, при което броят на светодиодите може да бъде намален. Наред с това увеличаването на работния ток има и няколко недостатъка. В зависимост от приложението тези недостатъци могат да бъдат приемлив компромис при постигане на по-голям светлинен поток от светодиодите. Ако времето на живот и ефективността са първи приоритети на проектирането, то осветителят трябва да работи с номинален работен ток, препоръчан от производителя на светодиодите, за да се постигне максимална ефективност и време на живот на светодиодите.

Недостатъци при повишаване на работния ток през светодиодите:

– Намалена ефективност.

Обяснение – Повишаването на работния ток води до повишаване на температурата на р-п прехода и до намаляване на вътрешната квантова ефективност на светодиодите.

– Намалена максимално допустима температура на околната среда или намалено време на живот.

Обяснение – По-високият ток увеличава температурната разлика между р-п прехода на светодиода и околната среда. С други думи, тъй като максималната температура на р-п прехода е вече определена, това намалява максимално допустимата температура на околната среда, при която може да работи осветителното тяло. Ако вместо намаляване на максимално допустимата температура на околната среда увеличаваме максималната температура на р-п прехода, излъчвателната ефективност на светодиода ще деградира по-бързо и ще се скъсява работният му живот.

Ако температурата на р-п прехода на светодиодите се поддържа по – ниска от 80°C по време на експлоатация независимо от условията на околната среда, времето, за което светлинният добив на светодиодите намалява до 70% от началния (L70) е по-голямо от 50 000 часа.

Оценка на светлинния поток

При избран брой светодиоди (n) светлинният поток при различни работни условия може да бъде оценен по следния начин:

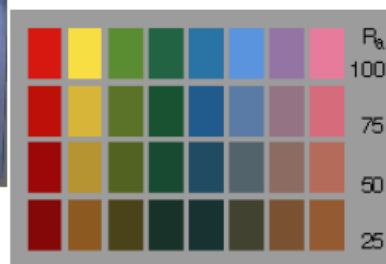
Светлинен поток = $n \cdot \Phi_{lm} \cdot \text{Оптическа ефективност} \cdot \text{Термична ефективност} \cdot K_{IF}$, където n е избраният брой светодиоди; Φ_{lm} – светлинен поток от един светодиод; оптична ефективност - около 0,9 (по литературни данни) [113-118]; термична ефективност – в зависимост от прогнозните стойности на температурата на р-п прехода T_j ; K_{IF} – относителна светлинна ефективност на светодиода при различни стойности на работния ток (по литературни данни) – например типични стойности са: $K_{IF} = 1$ при $I_F = 350 \text{ mA}$; $K_{IF} = 1.12$ при $I_F = 400 \text{ mA}$; $K_{IF} = 1.32$ при $I_F = 500 \text{ mA}$; $K_{IF} = 1.53$ при $I_F = 600 \text{ mA}$.

Качество на осветлението на базата на светодиоди.

Освен енергийната ефективност на даден светлинен източник много важна характеристика на светлинния поток, осигуряван от него е индексът на цветопрераждане (CRI) – фиг. 15.17 и 15.18, тема 11.



Индекс на цветопрераждане



Индекс на цветопрераждане

Фиг. 15.17 Сравнение на цветопрераждане под различни светлинни източници (ляво); Цветни ивици под различна светлина (дясно).

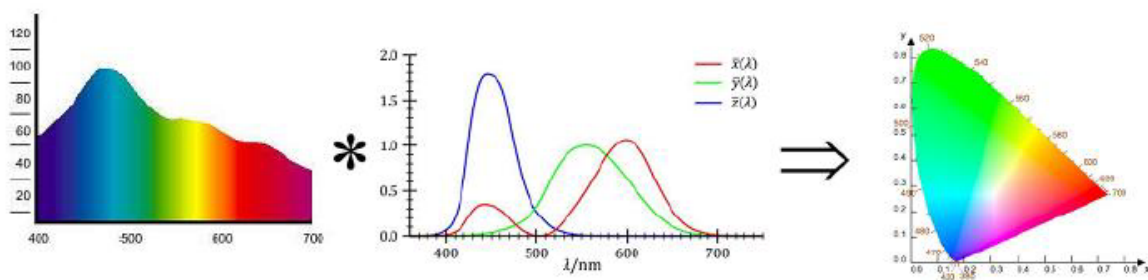
При проектиране на осветление за дадени цели трябва да се подбират светодиоди с необходимия индекс на цвето предаване (CRI), като е желателно той да бъде над 80.

Група	R_a	Значимост	Типично приложение
1A	90 ... 100	Точно съвпадение на цветовете	Галерии, медицински прегледи, цветообработка
1B	80...90	Цветовете могат да бъдат точно преценени	Къщи, хотели, офиси, училища
2	60...80	Умерено цвето предаване	Промисленост, офиси, училища
3	40...60	Точното цвето предаване не е от голямо значение	Промисленост, спортни зали
4	20...40	Точното цвето предаване е без значение	Улично осветление

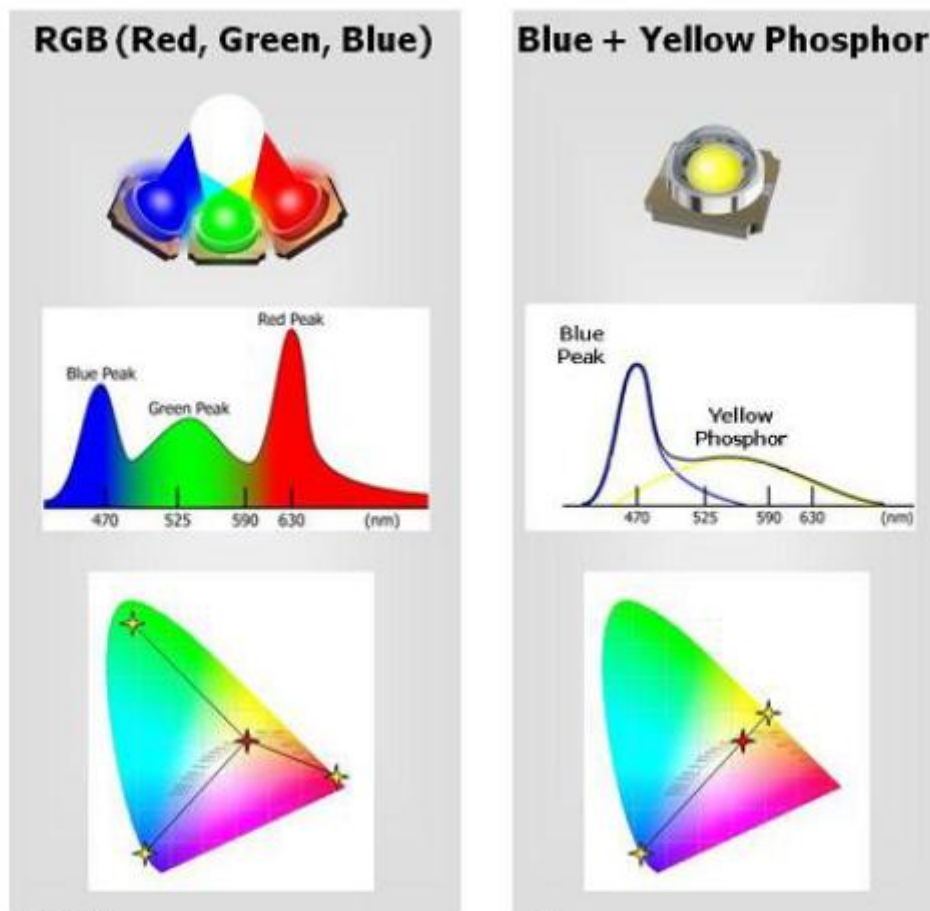
Групите за цвето предаване според CIE

Начини за получаване на бяла светлина при светодиодно осветление

Поради спецификата на спектралните характеристики на светлинния поток, излъчван от светодиодите, бяла светлина от светодиоден осветител може да се получи по два начина (фиг. 15.19) – чрез смесване на светлината от различни по цвят светодиоди или чрез преобразуване на спектъра на лъчението на светодиодната структура (сини светодиоди) с помощта на фосфорно покритие.



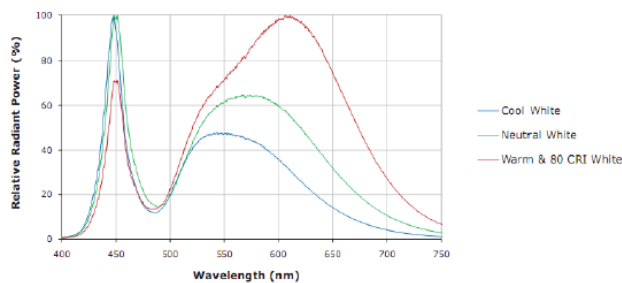
Фиг. 15.18 Цветовете в XYZ система



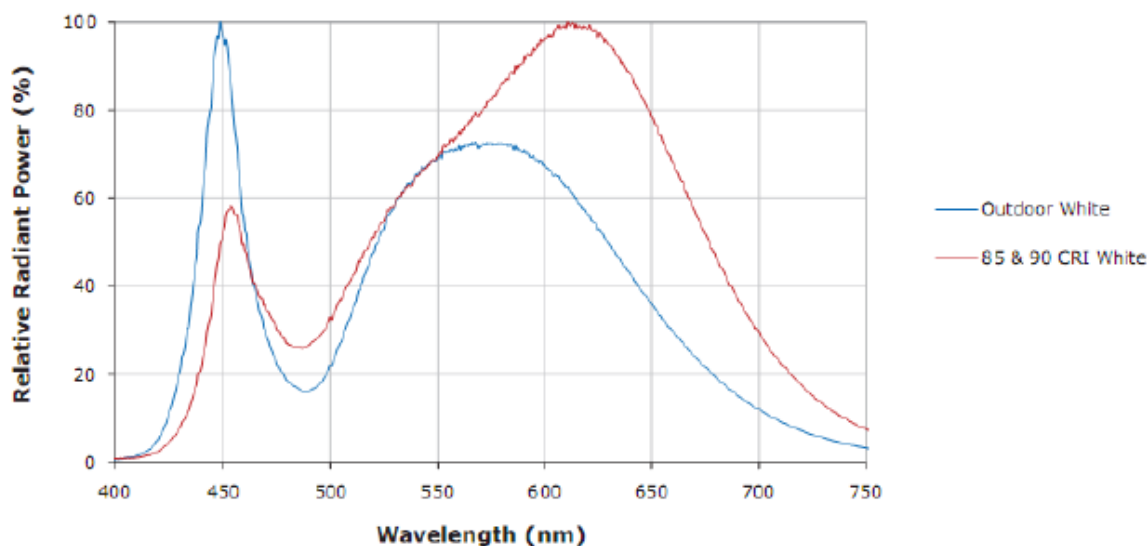
Фиг. 15.19 Начини за получаване на бяла светлина от светодиоди

На фиг. 15.20а и фиг. 15.20б са показани спектралните характеристики на различни светодиоди с различен индекс на цвето предаване (CRI).

Трябва да се има предвид силната компонента в спектъра на светодиодите в синята част на спектъра – на около 450 nm – фиг. 15.20. Такова лъчение е вредно за детското зрение. Ето защо за помещения, в които се работи продължително или са предназначени за деца задължително трябва да се използват светодиоди с голям индекс на цвето предаване - над 80 („топло бяло“) и не е желателно използване на източници с характеристики „студено бяло“ или дори „неутрално бяло“.



Фиг. 15.20а Спектрално разпределение на светлинния поток на различни светодиоди



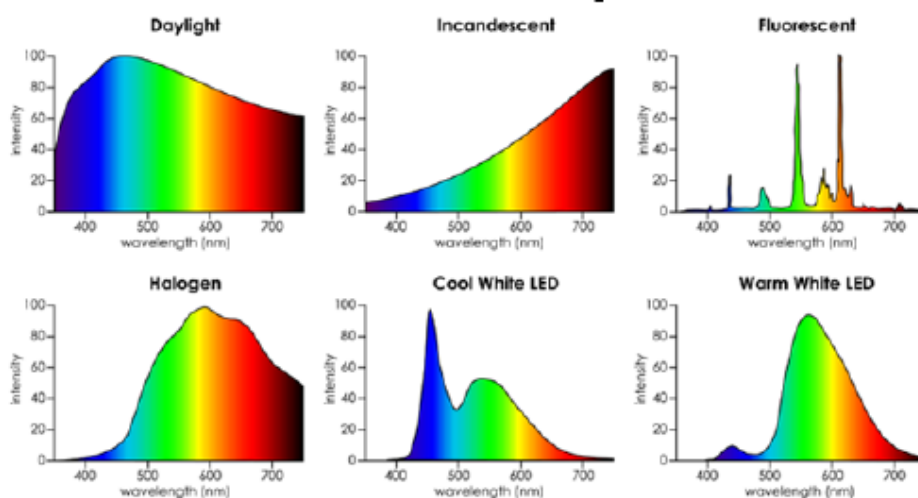
Фиг. 15.206 Спектрално разпределение на светлинния поток на различни светодиоди

1. Приложение за помещения, обитавани от хора.

През 2012 г. е публикуван докладът на Научната комисия по спешни и ново идентифицирани рискове за здравето (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) към Европейската комисия: „Ефекти върху здравето причинени от изкуственото осветление“ (Health Effects of Artificial Light). В него освен въпросите за здравните рискове, свързани с различните видове изкуствено осветление, са разгледани и възможностите за регулиране на спектралните характеристики на светлинните източници с цел положително влияние върху здравето на хората, настроението, работоспособността им и др. Интересът към тези въпроси нараства непрекъснато през последните няколко години (след 2014 г). Причините за това са свързани с възможностите за създаване на интегрирани енергийно ефективни светлинни източници, при които: характеристиките на светлинния поток да се променят в зависимост от нуждите; които могат да се програмират да имитират дневната светлина по спектрален състав и интензитет; светлинният поток да се управлява така, че да бъде оптимален за обитателите; в предприятия и офиси светлината да стимулира когнитивните способности, работоспособността и вниманието; след обяд спектралният състав да се променя така, че да не вреди на съня и т.н.

По-долу са показани спектралните характеристики на лъчението на различни светлинни източници. Както се вижда, характеристиките на повечето от тях са много далече от спектралните характеристики на слънчевата светлина.

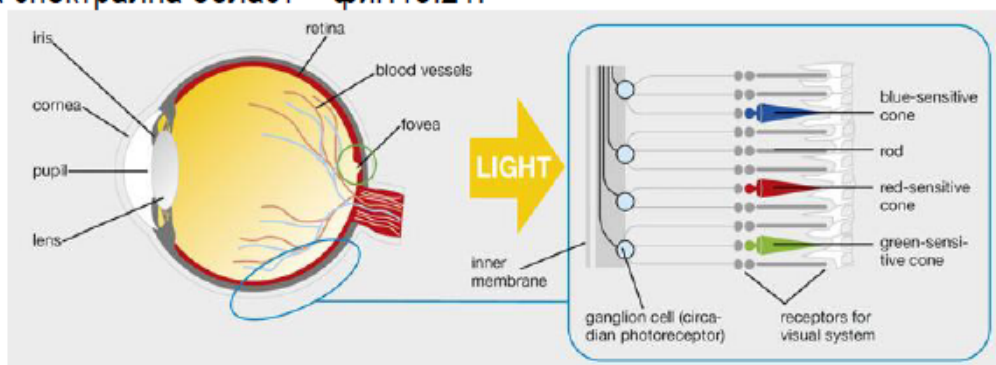
Спектри на светлинни източници



Дневна светлина (по обяд); лампа с нажежаема жичка; луминесцентна лампа

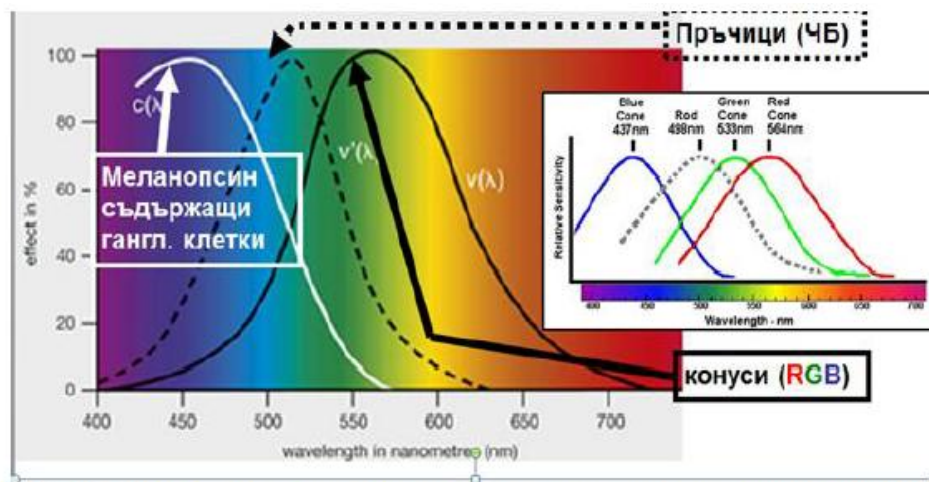
Халогенна лампа; LED – студенобяла; LED - топлобяла светлина

Развитието на светодиодните технологии в днешно време предоставя огромно разнообразие от различни източници на светлина с различни спектрални характеристики, подходящи за голям диапазон приложения. Трябва да се има предвид, че изкуствената светлина оказва значително влияние на хората. По време на постепенна еволюция хората са се адаптирали да следват естествения денонощен цикъл на светлината, идваща от слънцето. През 2002 г. проучвания са идентифицирали наличието на фоторецептори в човешкото око, които са отговорни за предаване на информация, която не е пряко свързана със зрението и централната нервна система. В окото съществуват ганглионни клетки, съдържащи меланопсин, които са чувствителни към светлина предимно в синята спектрална област – фиг.15.21.



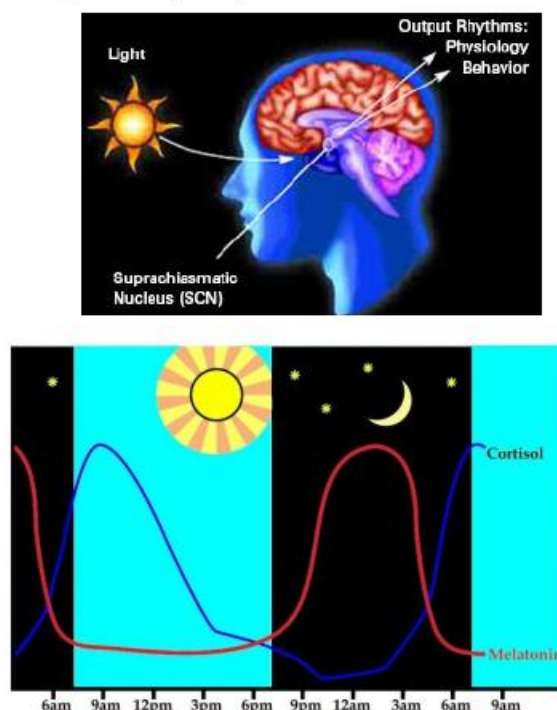
Фиг. 15.21. Рецептори в човешкото око. Пръчици (черно-бели детектори) и колбички/конуси (RGB). Ретинални ганглионни клетки съдържащи меланиопсин

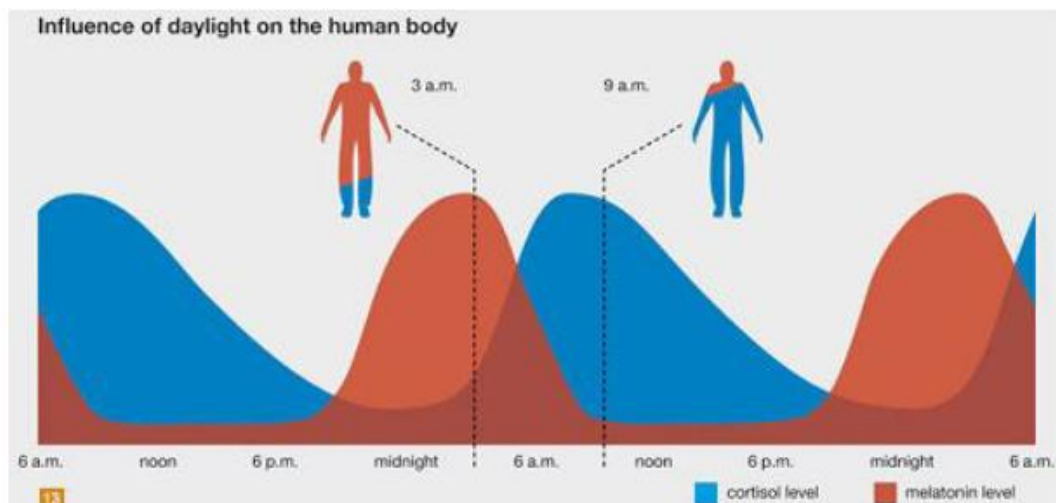
Като резултат те са отговорни за стимулиране на производството на кортизол - хормон на стреса, който стимулира метаболизма и разбужда тялото, същевременно се потиска производството на хормона мелатонин (фиг.15.22), който "подготвя" човешкото тяло за сън.



Фиг. 15.22. Спектрална чувствителност на ретинални *ганглионни клетки* съдържащи меланопсин, стимулиращ производството на кортизол и потискащ синтеза на мелатонин ($c(\lambda)$) - $440 \div 480$ nm; спектрална чувствителност на окото през нощта (скотопична крива $v'(\lambda)$) и през деня (фотопична крива $v(\lambda)$).

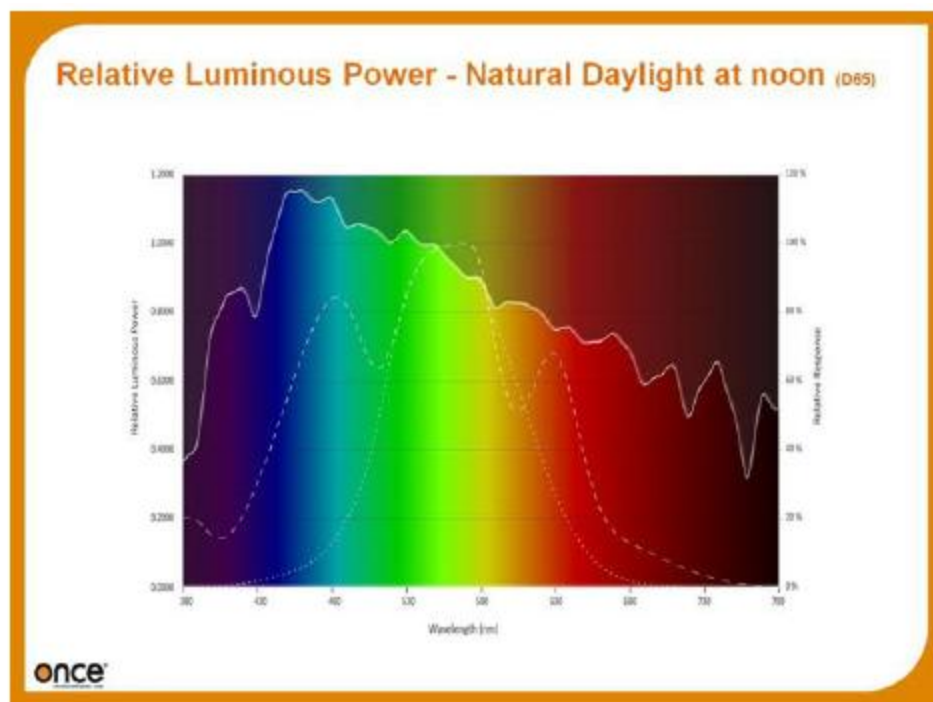
Нормалният ритъм на синтез на мелатонин (и неговият "противоположен" хормон за разбуждане - кортизол) осигуряват безпроблемното преминаване на различните режими на функциониране на човешкото тяло между деня и нощта, следвайки естествения денонощен цикъл на слънчевата светлина – фиг.15.23.





Фиг. 15.23. Влияние на светлината върху човешкото тяло – денонощен (циркаден) ритъм, определен от хормоните кортизол и мелатонин.

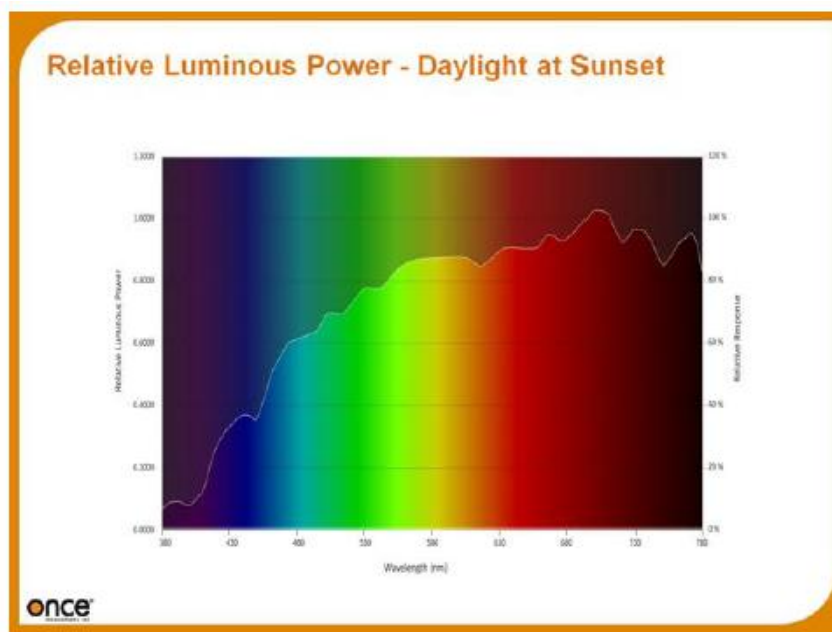
Когато слънцето е високо в небето, спектралният състав на светлината е по-интензивен в синьо-виолетовата част на спектъра, фиг. 15.24 .



Фиг.15.24. Спектър на слънчевата светлина по обяд.

Излъчването в тази част на спектъра (с максимум около 440 - 480 nm) – фиг. 15.22 стимулира производството на кортизол и подобрява познавателните способности, производителността на труда, концентрацията, вниманието и има положителен ефект върху настроението. От друга страна, светлината в тази част на спектъра потиска производството на мелатонин. Намаляването на производството на този хормон води до проблеми със съня и увеличава риска от заболявания от някои видове рак (рак на гърдата и други).

По време на залез слънчевата светлина преминава през по-дебел слой въздух, което води до намаляване на интензивността на лъчението в синята част на спектъра и се увеличава относителния дял на лъчението в червено-оранжевата спектрална област. Светлината с такъв спектрален състав не потиска производството на мелатонин и човешкото тяло по естествен път се подготвя за почивка и сън – фиг. 15.25.



Фиг.15.25. Спектър на слънчевата светлина при залез.

Анализът на изложените факти води до заключението, че за да бъде от полза за здравето, изкуствената светлина трябва да променя своя спектрален състав в съответствие с този на естествената слънчева светлина.

За стимулиране на вниманието, работоспособността, познавателните способности и настроението на хората светлинният поток от осветителното тяло трябва да бъде интензивен в спектралната област 440 ÷ 480 nm; цветната му температура трябва да е около 5000 ÷ 6000 K. За добро цвето предаване е желателно хроматичните координати на светлинния поток колкото е възможно да бъдат по-близо до локуса на Планк (вж. Тема Колориметрия).

В следобедните часове спектралните характеристики на светлинният поток от осветителното тяло трябва да се променят - интензивността в синята област трябва да се намали и цветната температура трябва да се намали до около 3000 K или дори по-малко (фиг. 15.22). По този начин няма да се потиска синтеза на мелатонин в човешкия организъм и тялото ще се подготвя за почивка и сън.



За вкъщи, вечер

- топло бяла (жълтеникава)
- 2700-3000K



За работа (в затворени помещения през деня)

- светло бяла (синкава)
- 5000-6000K

Индекс на цветопрераждане CRI $\geq 80\%$

ИЗКЛЮЧЕНИЯ:

Съществуват случаи, при които главната цел е поддържането на работоспособността, когнитивните способности и концентрацията на персонала. Това е с особена важност за области, в които работата е отговорна и грешките са недопустими. В тези случаи грижата за биологичните ритми и добрия сън са на по-заден план и изискванията към спектралния състав и мощността на осветлението са различни. Варианти на този тип осветление се използват в зали за учебна дейност на студенти. Екстремни решения на този тип осветление са свързани с различни военни приложения и аварийни ситуации, когато дори грижата за здравето отива на заден план.

Важно условие за коректното решаване на задачите, свързани със създаването на адаптивно осветление, е да се съобрази спектралният състав на лъчението с възрастовите особености на потребителите. Известно е, че спектралната чувствителност на човешкото око се мени чувствително в зависимост от възрастта. Зрението на децата е много по-чувствително към лъчението от синьо-виолетовата област от това на възрастните хора. Ето защо спектрален състав на осветление, който е подходящ за възрастни, може да се окаже дори опасен за малки деца.

Нивото на осветеност също може да играе ключова роля за ефективното здравословно влияние на светлината. Друга важна роля на светлината с голям интензитет върху здравето на възрастните хора е възможността да се засили вътрешният им циркаден часовник*, който започва да отслабва с нарастване на възрастта.

* Биологичният часовник на всеки човек, който оказва влияние върху всички молекулни, клетъчни и физиологични промени в тялото.

По тези причини при възрастни са необходими по-високи осветености и светлинен поток с по-голям интензитет в синята спектрална област, отколкото при млади хора за постигане на същия биологичен ефект.

Тук говорим за нормално битово осветление при здрави хора, а не за такова с терапевтични цели. Това поставя за решаване следния казус: потребителят на осветителното тяло трябва да може да настройва – да увеличава и да ограничава интензитета на лъчението в синьо-виолетовата област за постигане на конкретни цели и в зависимост от обитателите на помещението.

В тази връзка големите възможности при избор на характеристики на осветлението в дадено помещение (големина на светлинния поток, управление на спектралния състав, особено в синята спектрална област, избор на цветна температура) са значително предимство – осветлението за всекидневно използване може да играе значителна роля и за превенцията и намаляване на риска от различни заболявания като депресия, сезонно разстройство на настроението, деменция и др.

За тези цели е необходимо да се изпълняват няколко изисквания:

- За осветление в помещения, където обитателите са малки деца, както и късно следобед и вечер трябва да се осигури светлинен поток от топло бяла светлина (корелирана цветна температура (CCT) около 3000K и индекс на цвето предаване $CRI \geq 80$); светлинният поток да може да варира от няколкостотин до $2000 \div 3000 \text{ lm}$;

- За дневно осветление в помещения, обитавани от възрастни цветната температура трябва да може да се повишава до около 6000K (ако осветлението е за стаи, заети от хора в напреднала възраст, светлинният поток в синята спектрална област може да се увеличи допълнително, съответно цветната температура може да достига например до около 7500 ÷ 8000K).

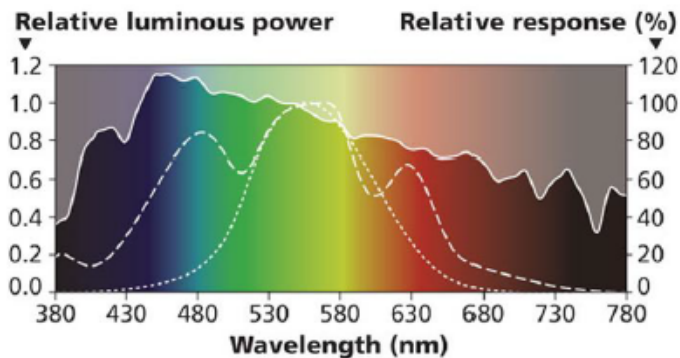
- Приложения на осветлението за терапевтични цели:

Трябва да са предвидени възможности за управление на светлинния поток по различни програми за осветление. Това ще представлява съществено предимство на разработваното осветително тяло, тъй като дава възможности за индивидуализиране на светлинната терапия за борба с депресивните състояния.

Според програмите за разработване и изпитване на светлинна терапия трябва да е възможно да се реализират следните характеристики на светлинния поток: осветеност на нивото на око до около 10000 lx и цветна температура 5000 ÷ 6000K; осветеност около 750 lx и цветна температура до около 17000K . Ако характеристиките на светлинния поток може да се променят плавно в интервалите между горните споменати параметри значително ще се разширят възможностите за прилагане на такова осветление за целите на светлинна терапия и ще позволи да се търсят оптимални програми за осветление в зависимост от индивидуалните характеристики на пациента.

2. Светодиодно осветление със спектрални характеристики, подходящи за приложения в птицевъдството.

Осветлението за птицеферми се развива бързо през последните няколко години. Тласъкът за това развитие идва от въвеждането на ефективни светодиоди за различни спектрални области, които правят възможно създаване на светлинни източници със спектрални и енергийни характеристики, оптимални за различни приложения. Известно е, че спектралната чувствителност на зрението на домашните птици се различава значително от тази на човешкото око – фиг. 15.26



Фиг. 15.26. Спектрална чувствителност на зрението на птици (пунктирана крива) и на човешко зрение (крива с точки) сравнена със спектъра на слънчевата светлина по обед.

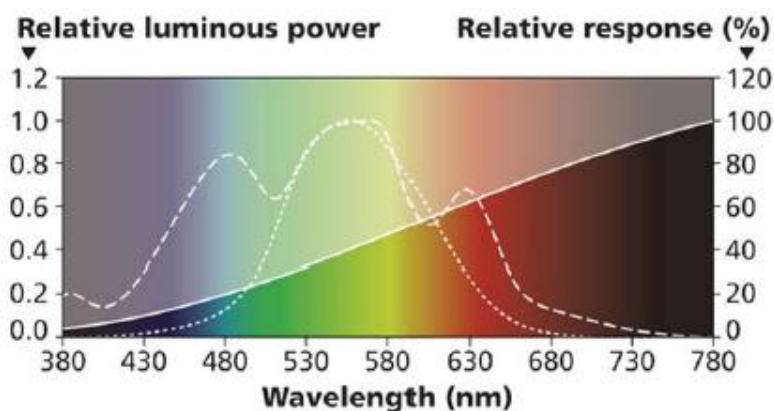
Светлината с различен спектрален състав оказва различно влияние върху растежа и поведението на птиците. Те са развили повишена чувствителност към лъчение в ултравиолетовата област (пик при 385 nm); в зелената спектрална област (при 550 nm, като хората); в синята (пик при 450 nm – 12 пъти над човешката чувствителност) и в червената спектрална област (при 640 nm – 4 пъти човешката чувствителност). Зелената светлина, например, значително увеличава скоростта на растеж в ранна възраст; синята - растежа при по-късна възраст, като намалява скоростта на движение и канибализма в късна възраст. Заедно, зелената и синята светлина стимулират по-ефективната секреция на тестостерон. Синята светлина подобрява храносмилането на фуража, намалява разходите и увеличава живота тегло.

Червената светлина стимулира и насърчава сексуалната активност и увеличава темповете на растеж за пилета и пуйки; увеличава движението, като по този начин свежда до минимум проблемите с краката в края на периода на отглеждане. Червената светлина също намалява количеството на консумацията на фураж за едно яйце без различия в размера на яйцата, теглото на черупката, дебелината ѝ, или масата на жълтъка и белтъка. Като цяло, червената светлина е доказано ефективна за удължаване на периода на производство и увеличаване на броя на яйцата, като потенциално намалява консумацията на храни.

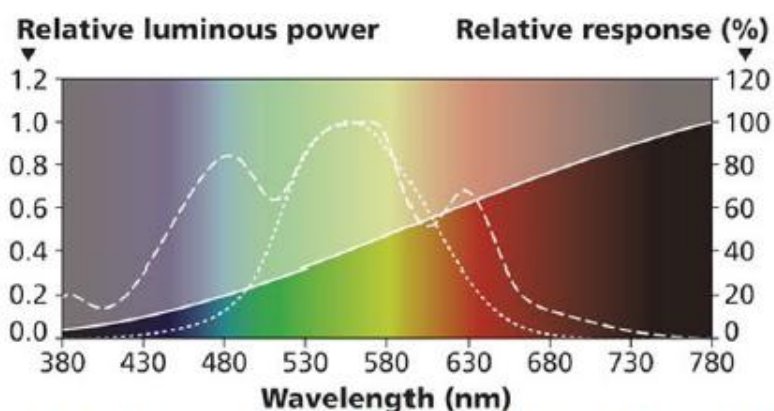
Спектралните характеристики на лъчистия поток, оптимални за отглеждането на различни видове домашни птици се различават значително от тези, получени от традиционни източници на светлина или източници, специално предназначени за употреба от хора. Традиционното осветление, използвано от производителите на птици варира в широки граници - лампи с нажежаема жичка, флуоресцентни лампи, студени флуоресцентни лампи, натриеви лампи с високо налягане, метал-халогенни лампи. Спектралните

характеристики на най-популярните източници на светлина в близкото минало (лампи с нажежаема жичка и флуоресцентно осветление) се различават значително от оптималните за птицеферми, което може да се види на фиг.15.27а и фиг.15.27б.

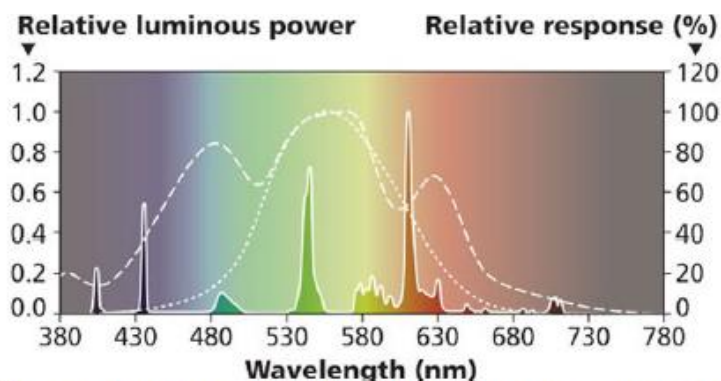
Плавното регулиране на тези източници на светлина е проблематично и допълнително намалява тяхната енергийна ефективност. За разлика димирането (управление на интензитета) на светодиодни източници на светлина е лесно за изпълнение и позволява управлението на техния светлинен поток в широки граници с незначително намаляване на светлинната ефективност.



Фиг. 15.27а. Спектрална чувствителност на зрението на птици (пунктирана линия) и на човек (линия с точки) в сравнение със спектъра на крушка с

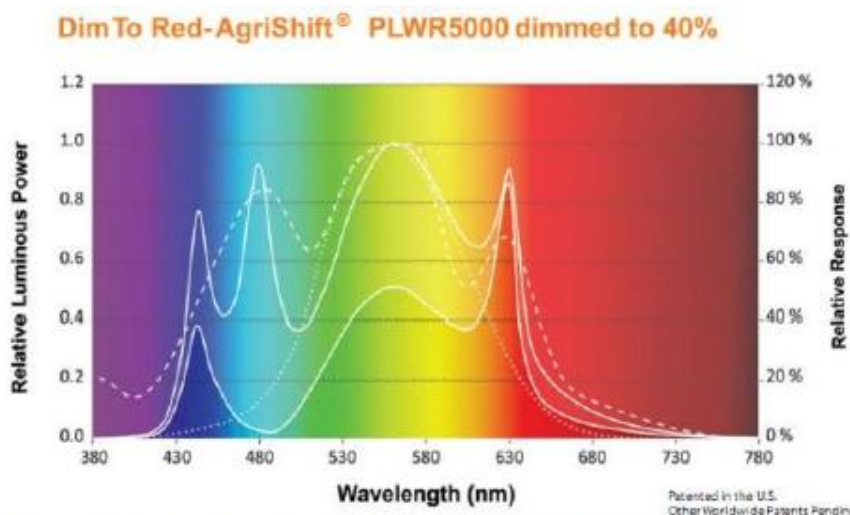


Фиг. 15.27а. Спектрална чувствителност на зрението на птици (пунктирана линия) и на човек (линия с точки) в сравнение със спектъра на крушка с нажежаема жичка (непрекъсната линия).



Фиг. 15.27б. Спектрална чувствителност на зрението на птици (пунктирана линия) и на човек (линия с точки) в сравнение със спектъра на луминесцентна лампа (непрекъсната линия).

Приложението на светодиоди с подходящи спектрални и мощностни характеристики дава възможност за създаване на светлинни източници с характеристики много близки до оптималните: подходящо спектрално разпределение на лъчението, устойчивост на външни влияния, дълъг експлоатационен живот, възможност за димиране на светлинния поток в широк диапазон и т.н – фиг. 15.28.



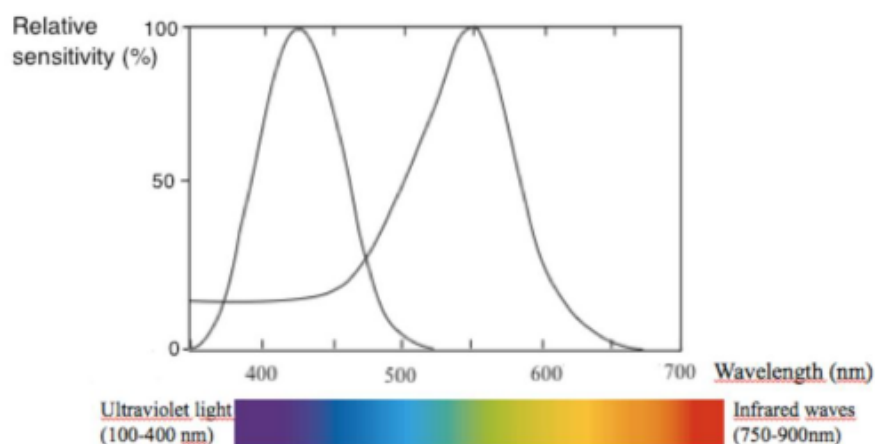
Фиг. 15.28. Спектрално разпределение на светлинния поток на светодиоден осветител, димирано до 40%, сравнено с оптималното разпределение за отглеждане на птици .

3. Осветление със спектрални характеристики, подходящи за приложение в животновъдството при производството на мляко.

Известно е, че разходите за осветление формират значителна част от цената на продуктите. Критериите за хуманно отношение към животните в развитите страни са подробно разработени и включват строги разпоредби по отношение на жилищното настаняване на животните и условията в тях. Необходимите светлинни условия за млечните крави включват достъп до дневна светлина през деня или изкуствена светлина, съответстваща на специфичните особености на зрението на кравите, а през нощта трябва да се осигури възможност за димиране на осветлението и промяна на спектралния му състав. Добре е известно, че продължителността на осветлението и спектралния състав на светлината оказват влияние върху производството на

мляко. При дневна светлина (наличие на светлина от синята спектрална област) нивата на мелатонин намаляват, но се увеличава производството на друг хормон - IGF-I. Функцията на IGF-I хормона е да стимулира активността на животното и, следователно, млечната му продукция. Емпирично е доказано и е прието, че в 24-часов цикъл при 16 часа дневна светлина с осветеност $100 \div 200$ lx (измерена на един метър височина от пода) и 8 часа затъмняване дава най-добри резултати. Поддържането на осветеност $150 \div 200$ лукса в цялата млечна ферма е скъпо и икономически неизгодно. Поради това системите за осветление в животновъдните стопанства трябва да позволяват димиране на светлинния поток в широк диапазон; спектралния състав на светлината да бъде в съответствие с времето на деня и фазата на развитието на животните. Необходимите нива на светлина могат да бъдат постигнати само в зоните за хранене около главите на животните.

При млечните крави, като при всички бозайници, циркадният цикъл зависи от промените в светлината, температурата, храната и водата. Предполага се, че най-голямо влияние върху циркадния цикъл имат интензивността и спектралния състав на светлината. Известно е, че кравите имат дихроматично виждане, тъй като техните рецептори са най-чувствителни в спектралната област между 440 и 480 nm, по-точно между 455 и 475 nm и между 500 и 600 nm – Фиг. 15.29.



Фиг. 15.29. Дихроматична чувствителност на зрението на крави при различни дължини на вълните.

Лъчението в синята спектрална област ($440 \div 480$ nm) потиска производството на мелатонин, стимулира производството на хормони IGF-I и увеличава добива на мляко. Това изисква използването на сини светодиоди в осветителни тела за млекопроизводители и използването на бели светодиоди - неутрално или студено бели - Фиг. 15.29.

Зрението на кравите не е чувствително в спектралния диапазон над 620 nm и се приема, че изкуственото нощно осветление трябва да бъде само в червената част на спектъра, за да е възможно обслужване на кравефермите без да се безпокоят кравите.

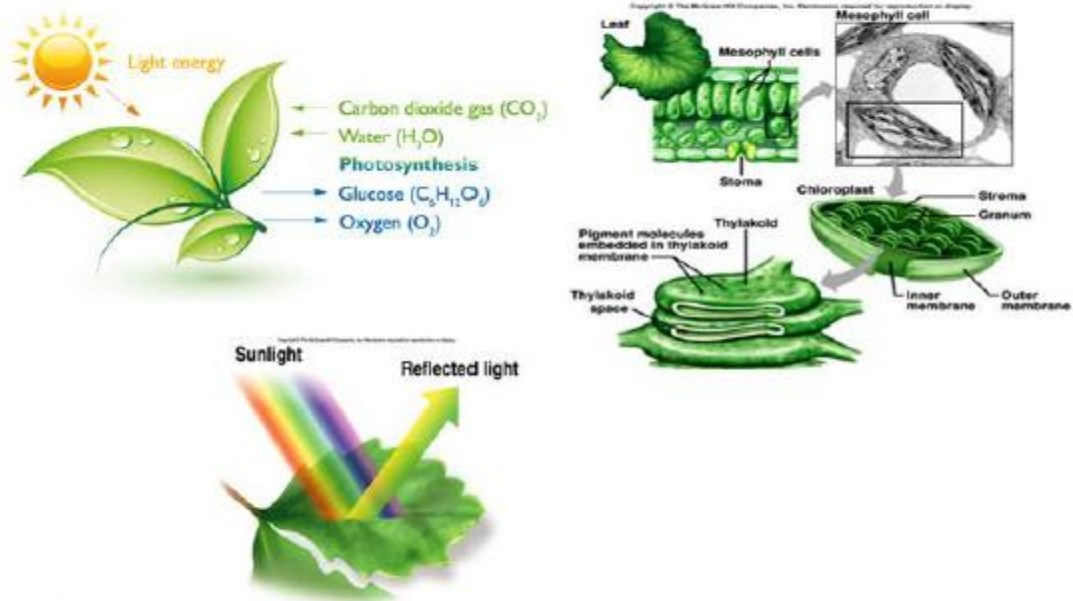
4. Осветление със спектрални характеристики, подходящи за приложения в оранжерийното производство.

Една от най-бързо развиващите се области на светодиодното осветление през последните няколко години е свързана с приложения в оранжерийното производство. Има много причини за това - значително намаляване на енергийните разходи; варианти за избор на подходяща мощност и спектрален състав на лъчението в зависимост от вида на растенията; възможности за управление на характеристиките на лъчистия поток в зависимост от етапа на развитието им и т.н. В същото време животът на светодиодното осветление с подходящо термично управление е много по-дълъг от този на осветителите, използвани по-рано, неговата работа е по-надеждна и е по-лесно обслужването му.

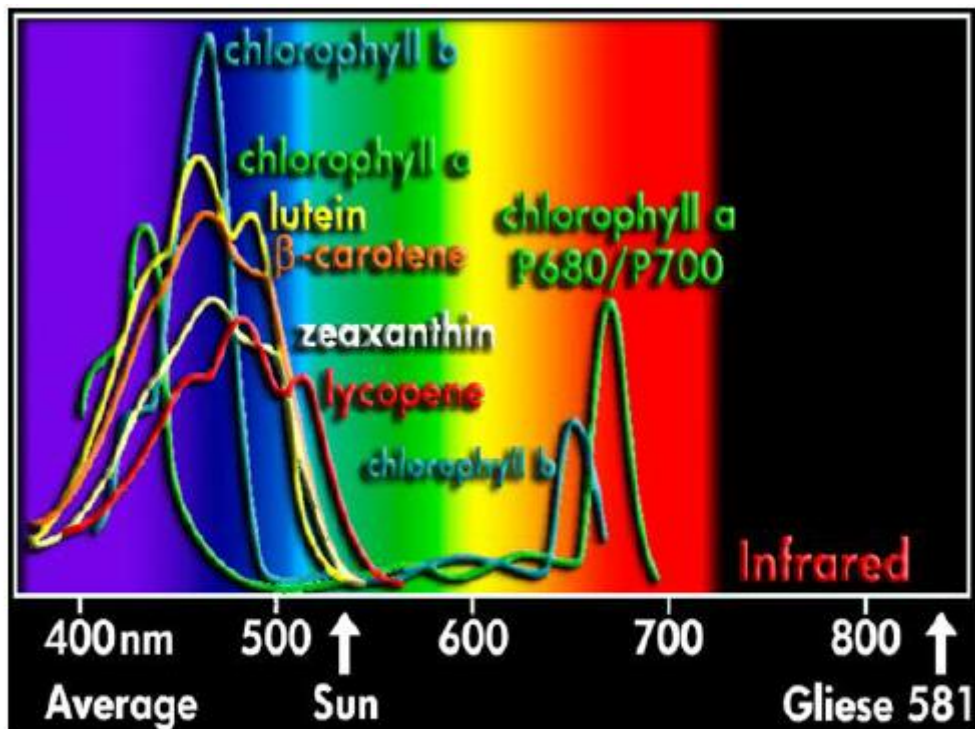
Типичните абсорбционни спектри на пигментите, които определят ефективността на процеса на фотосинтеза, са показани на Фиг.15.30. Трябва да се отбележи обаче, че тези спектри са приблизителни. В действителност ситуацията е много по-сложна.

Фотосинтезата е сложен процес. В него се извършват едновременно над 30 вида реакции. Основна роля във фотосинтезата играят растителните пигменти, изпълняващи ролята на първични акцептори на светлинните кванти и осъществяващи по-нататъшно превръщане на химичната енергия.

Растителните пигменти изпълняват ролята на първични акцептори на светлинните кванти.

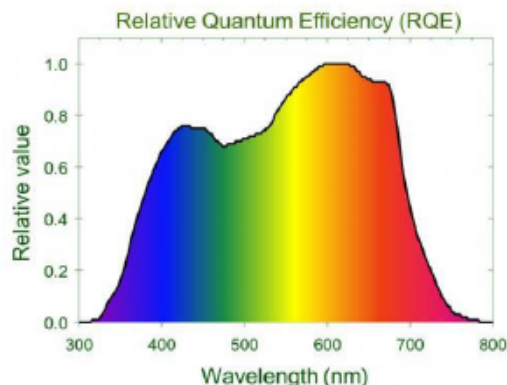


Спектрални характеристики на растителните пигменти, първични акцептори на светлинното лъчение.



б)

Фиг. 15.30. Спектрални характеристики на различни растителни пигменти.

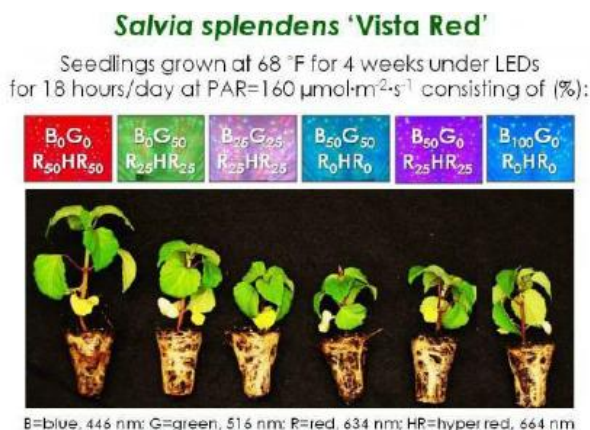


Фиг. 15.31. Относителна квантова ефективност на фотосинтезата.

Най-интензивно фотосинтезата протича в червената и в синьовиолетовата област на спектъра – фиг. 15.30, фиг.15.31. В процеса на еволюция растенията са се приспособили да поглъщат именно онези лъчи от спектъра, енергията на които се използва най-ефективно във фотосинтезата. Интензивността на всяка фотохимична реакция се определя не от количеството погълната енергия, а от броя погълнати кванти.

Ефективността на преобразуване на енергията на светлината в химична енергия при растенията се изчислява между 3 и 6% . Същинската ефективност на фотосинтезата варира значително при изменения в светлинния спектър, интензитета на светлината, температурата и концентрацията на въглероден диоксид, като границите на изменение на ефективността са между 0,1 и 8%.

Добре известно е, че различното спектрално разпределение на мощността (SPD) на светлинния поток стимулира растежа на различни части на растенията - корени, стъбла, листа и т.н. (Фиг. 15.32). Тъй като различното спектрално разпределение на мощността (SPD) на светлинния поток играе ключова роля в развитието на растенията, много важно е осветителното оборудване за този тип приложения да осигури прецизен контрол на спектралното разпределение на светлинния поток.



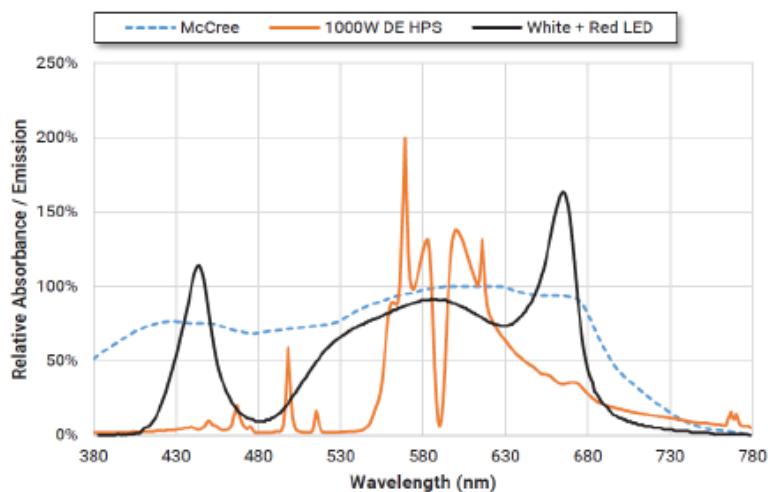
Фиг. 15.32. Развитие на салвия при различно съотношение синьо – червено лъчение в спектралното разпределение на светлинния поток.

За изкуствено осветление в растениевъдството досега най-широко използваните източници са натриеви лампи с високо налягане (HPS). Днес светодиодните технологии се развиват бързо и заместват HPS - "настоящият златен стандарт" в оранжерийното осветление. Целта е разработка на осветително оборудване, което да е поне толкова добро, колкото HPS, но да има около два пъти по-ниска консумация на енергия.

При нарастващия интерес към оранжерийното производство, което използва основно електрическо осветление, диодите, излъчващи светлина, имат много предимства. Това е особено важно за многослойно отглеждане на растения, където близките разстояния между растенията във вертикални рафтове правят HPS осветление непрактично.

Сегашното ниво в развитието на светодиодната техника се основава на разработените и широко разпространени ефективни интензивни тъмно сини светодиоди с дължина на вълната на излъчване 450 nm от индий-галиев нитрид (InGaN) и тъмно червени светодиоди от алуминий-индий-галиев фосфид (AlInGaP) с $\lambda = 660\text{nm}$. Те са високо ефикасни, тъй като превръщат около 45% от електрическата входна енергия във видима светлина. Зелените светодиоди се използват по-рядко поради тяхната значително по-ниска излъчвателна ефективност.

През последните години се появиха специализирани осветителни тела за оранжерийно производство на базата на ефективни бели светодиодни модули. Комбинацията от бели светодиодни модули с червени и тъмно сини светодиоди позволява създаване на ефективни източници на светлина с подходящи спектрални характеристики за отглеждане на растения. На Фиг. 15.33 са представени спектралните характеристики на такъв източник в сравнение със спектралната ефективност на фотосинтезата и характеристиките на HPS лампа. Консумацията на енергия на светодиодното осветително тяло е два пъти по-малка при практически еднакви (или по-добри) характеристики от тези на лампата HPS.



Фиг. 15.33. Крива на квантова ефективност на фотосинтезата (McCree) и спектрални характеристики на HPS и LED лампи.

Philips Greenpower LED Lighting in horticulture.



Фиг. 15.34. Приложение на светодиодно осветление в оранжерийното производство.

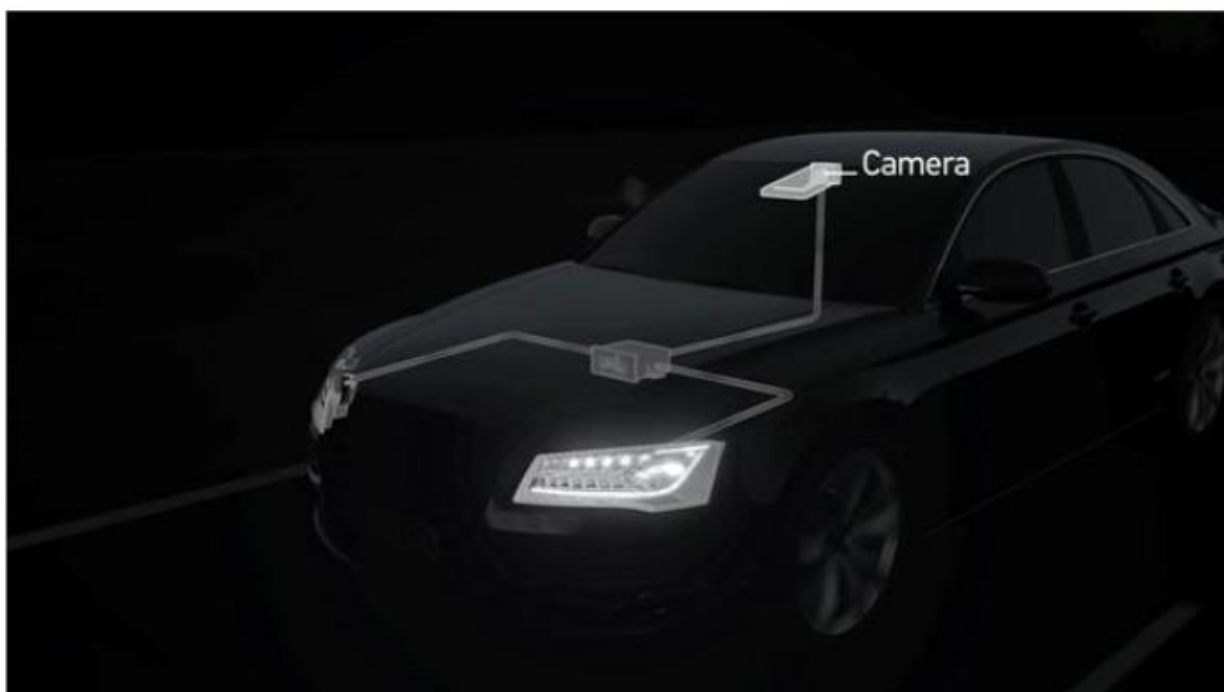
5. Приложение на светодиодно осветление при автомобилни фарове

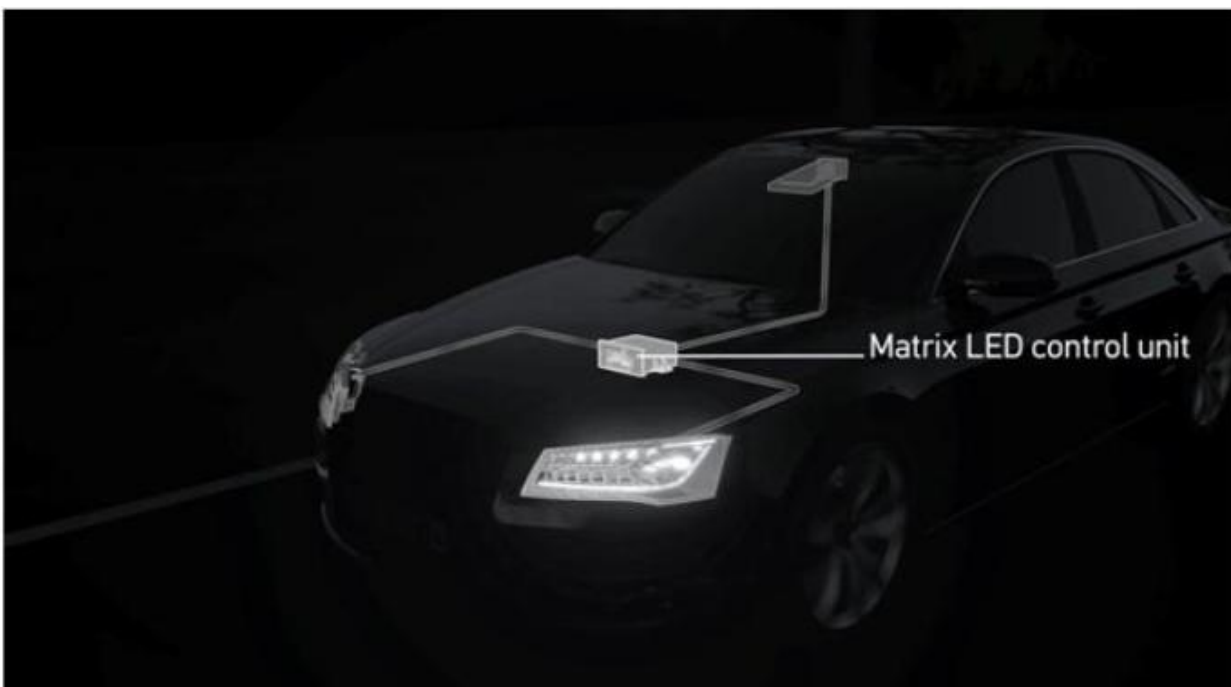
- Осигурява по-голям светлинен поток и от ксеноновите фарове при няколко пъти по-малък разход на електроенергия;





- Позволява осветяване на максимална площ от пътя (и в завой), като компютърното управление на фаровете осигурява такова разпределение на светлинния поток, че другите участници в движението не се заслепват.





Съчетанието: матрични фарове; камера, която следи пътната обстановка и компютър, който управлява работата на отделните секции на фаровете осигуряват оптимално осветление на пътя.



