

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

В. С. Солдаткин

## **ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЕТОТЕХНИКА**

Методические указания по практической и самостоятельной работе для  
студентов технических направлений подготовки и специальностей

Томск  
2022

УДК 628.9  
ББК 32.88  
С 600

**Солдаткин Василий Сергеевич**

С 600 Полупроводниковая светотехника: методические указания по практической и самостоятельной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей / В.С. Солдаткин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022 – 26 с.

Настоящие методические указания по практической и самостоятельной работе для студентов технических направлений подготовки и специальностей составлены с учетом требований федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания предназначены для студентов, изучающих специальную дисциплину «Полупроводниковая светотехника» и содержат необходимую информацию, используемую для проведения практических занятий и самостоятельной работе студентов.

Одобрено на заседании каф. РЭТЭМ протокол № 78 от 16.02.2022.

УДК 628.9  
ББК 32.88

© Солдаткин В.С., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Практическое занятие № 1 «Расчёт температуры светодиода».....	4
Краткая теория.....	4
Задача по практическому занятию № 1.....	4
Практическое занятие № 2 «Светотехнические характеристики источников света».....	6
Краткая теория.....	6
Задача по практическому занятию № 2.....	8
Практическое занятие № 3 «Светотехнические характеристики источников света».....	10
Краткая теория.....	10
Задача по практическому занятию № 3.....	10
Практическое занятие № 4 «Длины волн источников излучения» .....	11
Задача по практическому занятию № 4.....	11
Практическое занятие № 5 «Срок службы светодиодов» .....	13
Краткая теория.....	13
Задача по практическому занятию № 5.....	13
Задание на самостоятельную работу № 1 «Инфракрасное излучение».....	15
Краткая теория.....	15
Задание на самостоятельную работу № 1 .....	15
Задание на самостоятельную работу № 2 «Красного цвета свечения».....	16
Краткая теория.....	16
Задание на самостоятельную работу № 2 .....	16
Задание на самостоятельную работу № 3 «Оранжевый и жёлтый цвета свечения» .....	17
Краткая теория.....	17
Задание на самостоятельную работу № 3 .....	17
Задание на самостоятельную работу № 4 «Зелёный цвет свечения».....	18
Краткая теория.....	18
Задание на самостоятельную работу № 4 .....	18
Задание на самостоятельную работу № 5 «Синий цвет свечения» .....	19
Краткая теория.....	19
Задание на самостоятельную работу № 5 .....	19
Задание на самостоятельную работу № 6 «Фиолетовый цвет свечения».....	20
Краткая теория.....	20
Задание на самостоятельную работу № 6 .....	20
Задание на самостоятельную работу № 7 «Ультрафиолетовое излучение».....	21
Краткая теория.....	21
Задание на самостоятельную работу № 7 .....	22
Задание на самостоятельную работу № 8 «Светодиоды белого цвета свечения» .....	23
Краткая теория.....	23
Задание на самостоятельную работу № 8 .....	24
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	25

## Практическое занятие № 1 «Расчёт температуры светодиода»

Целью работы является научиться рассчитывать температуру светодиода через тепловое сопротивление.

### Краткая теория

В микроэлектронике для оценки способности конструкции отводить тепло от активной области кристалла, используя следующие формулы для определения теплового сопротивления:

$$P_e = \frac{(T_1 - T_2)}{R_t}, \quad (1)$$

где,  $P_e$  – мощность, рассеиваемая в данном компоненте;  
 $T_1, T_2$  – значения температуры двух тел или тела и среды ( $T_1$  более высокая температура, чем  $T_2$ );

$R_t$  – тепловое сопротивление.

Для слоевой структуры тепловое сопротивление каждого слоя приближённо оценивается по формуле:

$$R_t = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (2)$$

где,  $\delta$  – толщина слоя (м);

$S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);

$\lambda$  – теплопроводность вещества (Вт/м·К).

### Задача по практическому занятию № 1

Нагретый электронный элемент потребляет постоянное напряжение  $U_{np} = 3,2$  В при прямом токе  $I_{np} = 20$  мА, расположен на медной пластине размерами  $1000 \times 1000 \times 100$  мкм<sup>3</sup>, всё тепло от нагретого элемента проходит через данную пластину. Необходимо определить температуру электронного элемента, если температура окружающей среды составляет  $T_{окр} = 25$  °С.

#### Дано:

$$U_{np} = 3,2 \text{ В},$$

$$I_{np} = 20 \text{ мА},$$

медная пластина с размерами  $1000 \times 1000 \times 100$  мкм<sup>3</sup>,

теплопроводность меди 400 Вт/м·К,

$$T_{окр} = 25 \text{ °С}.$$

Определить:

Температуру электронного элемента  $T_э$ .

#### Решение:

Определим тепловое сопротивление  $R_t$ , используя формулу:

$$R_t = \delta / (\lambda \cdot S)$$

где  $\delta$  – толщина слоя (м);

$S$  – площадь слоя (м<sup>2</sup>);

$\lambda$  – теплопроводность меди (Вт/м·К).

$$R_t = 0,0001 / (0,001 \times 0,001 \times 400) = 0,25 \text{ К/Вт}.$$

Определим рассеиваемую мощность по формуле:

$$P = U_{np} \times I_{np},$$

$$P = 3,2 \text{ В} \times 0,02 \text{ А} = 0,064 \text{ Вт} = 64 \text{ мВт}.$$

Определим температуру электронного элемента  $T_э$  по формуле:

$$T_э = T_{окр} + (R_t \times P),$$

$$T_э = 25 \text{ °С} + (0,25 \text{ К/Вт} \times 0,064 \text{ Вт}) = 25,016 \text{ °С}.$$

**Ответ:**

Температура электронного элемента  $T_э = 25,016$  °С.

**Индивидуальное задание**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_{окр}(°C)$	-60	-45	-25	-10	0	10	15	20	25	30
$U_{np}$ (В)	1	2	3	5	10	15	3,5	2,5	5,5	1,5
$I_{np}$ (А)	15	5	2	3	4	1	7	6	8	9
Пластины с размерами $1000 \times 1000 \times 100$ мкм <sup>3</sup>										
Материал пластины	медь	серебро	золото	алюминий	алмаз	нитрид алюминия	кремний	платина	олово	Карбид кремния

**Определить:** температуру электронного элемента.

## Практическое занятие № 2 «Светотехнические характеристики источников света»

Целью работы является знакомство с методами расчёта светотехнических характеристик источников света.

### Краткая теория

Свет – это видимая область электромагнитного излучения в диапазоне от 380 до 750 нм. В таблице 1 приведены диапазоны спектров оптического излучения.

Таблица 1. Диапазоны спектров оптического излучения

ИК – излучен (10 <sup>3</sup> – 10 <sup>5</sup> ГГц) 300 мкм – 750 нм	Видимый свет (10 <sup>13</sup> – 10 <sup>15</sup> ГГц) 750 – 380 нм	УФ – излучение (7,5·10 <sup>14</sup> Гц – 3·10 <sup>16</sup> Гц) 380 нм – 10 нм
Сверхдальняя зона 34 – 15 мкм	Красный 620 – 760 нм	Ближний (длинноволновый) 400 – 300 нм
Дальняя зона 15 – 6 мкм	Оранжевый 590 – 620 нм	Средний (средневолновый) 300 – 200 нм
Средняя зона 6 – 3 мкм	Жёлтый 560 – 590 нм	Дальний (коротковолновый) 200 – 122 нм
Ближняя зона 3 – 0,76 мкм	Зелёный 500 – 560 нм	Экстремальный 121 – 10 нм
	Голубой 470 – 500 нм	
	Синий 430 – 470 нм	
	Фиолетовый 380 – 430 нм	

Человеческий глаз содержит экстерорецепторы называемые колбочками. Восприятие человеком света описывается фотопической функцией, графическая зависимость приведена на рисунке 1.

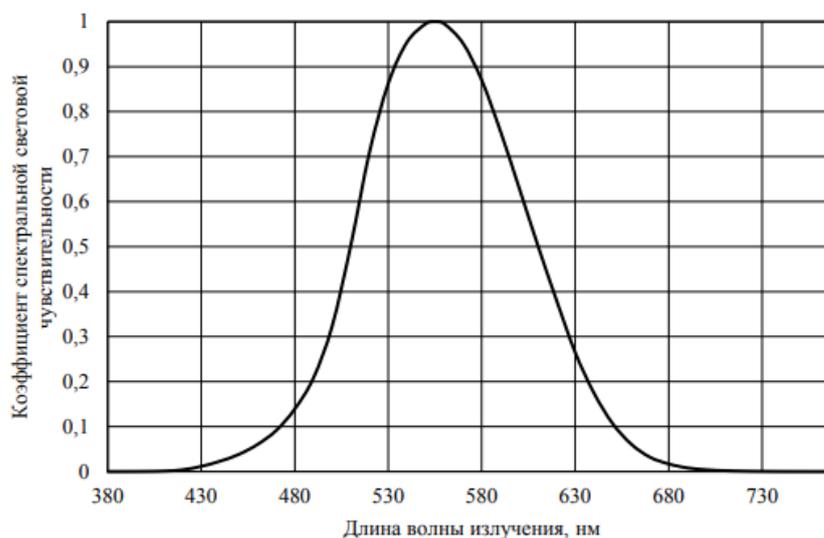


Рисунок 1 – Фотопическая функция

Основываясь на фотопической функции физические величины, описывающие излучение можно разделить на энергетические и световые. Переход от энергетических величин к световым осуществляется по формуле (5):

$$\Phi = 683(\text{лм/Вт}) \times K \times P \quad (3)$$

где,  $\Phi$  – световой поток, лм;  $K$  – уровень спектральной световой чувствительности для данной длины волны излучения;  $P$  – оптическая мощность излучения, Вт.

В таблице 2 приведены энергетические величины в таблице 3 световые.

Таблица 2. Энергетические величины

Наименование	Символ	Единица измерения		
		Россия	Система СИ	Квантовый аналог
Поток излучения	$\Phi_e$	Вт	$W$	$N_{ph}/s$ (кол-во фотонов в секунду)
Энергия излучения	$Q_e$	Дж	$J$	$N_{ph}$ (кол-во фотонов)
Энергетическая сила излучения (сила излучения)	$I_e$	Вт/ср	$W/sr$	$N_{ph}/sr \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле 1ср в секунду)
Поверхностная плотность потока излучения	$M_e$	Вт/м <sup>2</sup>	$W/m^2$	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов излучаемых с 1м <sup>2</sup> в секунду)
Энергетическая освещенность (облученность)	$E_e$	Вт/м <sup>2</sup>	$W/m^2$	$N_{ph}/m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов на 1м <sup>2</sup> в секунду)
Энергетическая яркость	$L_e$	Вт/ср*м <sup>2</sup>	$W/sr \cdot m^2$	$N_{ph}/sr \cdot m^2 \cdot s$ (кол-во фотонов в телесном угле в 1ср на 1м <sup>2</sup> в секунду)

Таблица 3. Световые величины

Наименование	Символ	Единица измерения	
		Россия	Система СИ
Световой поток	$\Phi_v$	лм	$lm$
Световая энергия	$Q_v$	лм*с	$lm \cdot s$
Сила света	$I_v$	лм/ср = кд	$lm/sr = cd$
Поверхностная плотность светового потока	$M_v$	лм/м <sup>2</sup>	$lm/m^2$
Освещенность	$E_v$	лк	$lm/m^2 = lx$
Яркость	$L_v$	лм/ср*м <sup>2</sup> = кд/м <sup>2</sup> = нит	$lm/sr \cdot m^2 = cd/m^2 = nit$

Мощность излучения или поток излучения – это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через известную площадь

$$\Phi_e (P_e) = dQ_e/dt \quad (4)$$

где,  $\Phi_e$  – поток излучения (Вт),  $P_e$  – мощность излучения (Вт);

$Q_e$  – энергия излучения (Дж);

$t$  – время (с).

Сила излучения – поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла в котором он распространяется.

$$I_e = \Phi_e/\Omega \quad (5)$$

где,  $I_e$  – сила излучения (Вт/ср);

$\Phi_e$  – поток излучения (Вт);

$\Omega$  - телесный угол (ср).

Телесный угол расположен в конусе с вершиной в центре сферы (место расположения источника излучения) и равен отношению площади, вырезанной в сфере этим конусом к квадрату радиуса сферы, измеряется в стерadiansах.

$$\Omega = S/r^2 \quad (6)$$

где,  $\Omega$  – телесный угол (ср),

$S$  – площадь основания конуса ограниченного сферой в которой распространяется излучение,

$r$  – радиус сферы в которой распространяется излучение.

Поверхностная плотность потока излучения – поток излучения, проходящий через единицу поверхности по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла.

Если площадка освещается потоком, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической освещенности или облученности:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (7)$$

где  $E_e$  – энергетической освещенности или облученности (Вт/м<sup>2</sup>);  
 $\Phi_e$  – поток излучения (Вт);  
 $S$  – единица площади (м<sup>2</sup>).

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости:

$$E_e = d\Phi_e/dS \quad (8)$$

где  $M_e$  – энергетической освещенности или облученности (Вт/м<sup>2</sup>);  
 $\Phi_e$  – поток излучения (Вт);  
 $S$  – площадь поверхности источника (м<sup>2</sup>).

*Энергетическая яркость* – величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении:

$$L_e = d^2\Phi_e/d\Omega dS \cos\theta \quad (9)$$

где,  $L_e$  – энергетическая яркость (Вт/ср·м<sup>2</sup>);  
 $\Phi_e$  – поток излучения (Вт);  
 $S$  – площадь поверхности источника (м<sup>2</sup>);  
 $\theta$  – угол между направлением излучения и нормалью к площадке.

Световой поток,  $\Phi_v$  – это величина, образуемая от лучистого потока  $\Phi_e$  при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО, измеряется в люменах, лм. Световой поток Солнца равен  $3,63 \cdot 10^{28}$  лм, световой поток лампы накаливания мощностью 100 Вт составляет 1250 лм, мощность светодиодной лампы со световым потоком 1250 лм составляет примерно 10 Вт.

Сила света – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в котором он распространяется, измеряется в канделах, кд. Кандела от лат. – свеча, одна кандела примерно соответствует силе света свечи.

Освещенность – световой поток, проходящий через единицу поверхности по всевозможным направлениям в пределах полусферического телесного угла, измеряется в люксах, лк.

Яркость – величина световой поток, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла в данном направлении, измеряется в кд/м<sup>2</sup>.

Световая отдача  $n$  (лм/Вт) – отношение излучаемого светового потока к мощности, потребляемой источником света. Световая отдача определяется по формуле:

$$n = \Phi_v / P, \quad (10)$$

где,  $n$  – световая отдача, лм/Вт;  $\Phi_v$  – световой поток, лм;  $P$  – потребляемая мощность, Вт.

## Задача по практическому занятию № 2

В светодиодном кристалле генерируется свет, при выходе из кристалла свет, лишь часть его может выйти из кристалла, за счёт разности двух сред – воздуха и материала полупроводника. Так как из законов оптики часть светового потока отражается (коэффициент отражения  $\rho$ ), часть рассеивается (коэффициент рассеивания  $\sigma$ ), часть поглощается (коэффициент поглощения  $\alpha$ ) и лишь часть проходит насквозь (коэффициент пропускания  $\tau$ ). Необходимо определить критический угол и долю вышедшего излучения из светодиодного кристалла  $GaN$  в воздух.

Дано:

Показатель преломления воздуха,

показатель преломления кристалла  $GaN$ ,

$P_{внутр}$  мощность оптического излучения внутри кристалла

Определить

Критический угол  $\varphi_{кр}$ ,

долю оптической мощности вышедшей из кристалла  $P_{внеш}$ .

**Решение:**

По формулам:

$$\varphi_{кр} = \arcsin(n_2 / n_1),$$

$$P_{внеш} / P_{внутр} = (1/4) \times (n_2^2 / n_1^2)$$

Рассчитаем значения  $\varphi_{кр}$  и  $P_{внеш}$ .

Ответ

Критический угол для  $GaN$  составляет  $\varphi_{кр} = 23,6$  град., а доля вышедшего излучения в воздух  $P_{внеш} = 4,18\%$ .

### Индивидуальное задание

№	$n_1$	$n_2$	$P_{внутр}$
1	1	1,1	2
2	2,1	1,1	1,5
3	1,5	1	3
4	1,7	1,5	1
5	1	2	2,5
6	1,3	1	2
7	1	1,3	3
8	1,1	1,7	2
9	2,2	1,5	1
10	3	2,5	1

**Определить** значение критического угла  $\varphi_{кр}$  и доли вышедшего излучения в воздух  $P_{внеш}$ .

### Практическое занятие № 3 «Светотехнические характеристики источников света»

Цель работы: научиться рассчитывать освещённость рабочего места.

#### Краткая теория

Освещённость определяется по формуле:

$$E = I / r^2, \quad (11)$$

где,  $I$  – силы света, кд;

$r$  – расстояние от источника освещения до поверхности, м.

Сила бактерицидного излучения определяется по формуле:

$$I = \Phi / \Omega \quad (12)$$

где,  $\Phi$  – световой поток, лм;

$\Omega$  – телесный (объёмный) угол.

Для пересчёта значения телесного (объёмного) угла  $\Omega$  из стерадиан в плоский угол по уровню 0,5 от максимального значения силы бактерицидного излучения ( $\phi$ ) в градусы используется формула:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(((\phi \times \pi) / 180) / 2)) \quad (13)$$

#### Задача по практическому занятию № 3

**Определить** значение светового потока источника света, варианты в соответствии со списком группы:

№	Освещённость	Расстояние, м	Световой поток
1	300	0,1	
2	300	0,2	
3	300	0,3	
4	300	0,4	
5	300	0,5	
6	300	0,6	
7	300	0,7	
8	300	0,8	
9	300	0,9	
10	300	1,0	
11	500	0,1	
12	500	0,2	
13	500	0,3	
14	500	0,4	
15	500	0,5	
16	500	0,6	
17	500	0,7	
18	500	0,8	
19	500	0,9	
20	500	1,0	

## Практическое занятие № 4 «Длины волн источников излучения»

### Задача по практическому занятию № 4

Вычислить значения световых потоков  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  светодиодного источника света на длинах волн  $\lambda_1 = 450$  нм,  $\lambda_2 = 550$  нм,  $\lambda_3 = 650$  нм, если для каждого из соответствующих потоков оптическая мощность равна  $P = 2$  Вт.

Дано:

$$\lambda_1 = 450 \text{ нм}, \lambda_2 = 550 \text{ нм}, \lambda_3 = 650 \text{ нм},$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = 2 \text{ Вт}.$$

Определить:  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ .

### Решение:

Соотношения между световым потоком и оптической мощностью излучения:

$$\Phi = 683 \times k(\lambda) \times P$$

где,  $k(\lambda)$  – уровень спектральной световой чувствительности для данной длины волны излучения.

Таблица 1. Фотопическая функция человеческого глаза

$\lambda$ , нм	K	$\lambda$ , нм	K	$\lambda$ , нм	K	$\lambda$ , нм	K
380	0,00004	480	0,139	580	0,870	690	0,0082
390	0,00012	490	0,208	590	0,757	700	0,0041
400	0,00040	500	0,323	600	0,631	710	0,0021
410	0,0012	510	0,503	610	0,503	720	0,00105
420	0,0040	520	0,710	620	0,381	730	0,00052
430	0,0116	530	0,862	630	0,265	740	0,00025
440	0,023	540	0,954	640	0,175	750	0,00012
450	0,038	550	0,995	650	0,107	760	0,00006
460	0,060	555	1,0000	660	0,061	770	0,00003
470	0,091	560	0,995	670	0,032		
		570	0,952	680	0,017		

$$\lambda_1 = 450 \text{ нм}, \rightarrow k(\lambda_1) = 0,038;$$

$$\lambda_2 = 550 \text{ нм}, \rightarrow k(\lambda_2) = 0,995$$

$$\lambda_3 = 650 \text{ нм}, \rightarrow k(\lambda_3) = 0,107$$

Тогда световые потоки будут равны:

$$\Phi_1 = 683 \times 0,038 \times 2 = 51,6 \text{ лм};$$

$$\Phi_2 = 683 \times 0,995 \times 2 = 1359,2 \text{ лм};$$

$$\Phi_3 = 683 \times 0,107 \times 2 = 146,2 \text{ лм}.$$

### Ответ:

Значения светового потока для каждой длины волны составили:

$$\Phi_1 = 51,6 \text{ лм}; \Phi_2 = 1359,2 \text{ лм}; \Phi_3 = 146,2 \text{ лм}.$$

### Индивидуальное задание

№	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
1	1	2	3	440	530	640
2	1,5	3	2	445	555	645
3	3	2,5	1	455	555	650
4	1	3,5	2	380	470	590
5	1,5	3,5	2	460	570	620

6	2,5	1,5	3,5	450	525	627
7	2	3	3	470	530	630
8	2,5	3	2	430	535	635
9	1,7	3,5	2,5	465	540	670
10	3	2	1	477	550	680

**Определить:**  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ .

## Практическое занятие № 5 «Срок службы светодиодов»

### Краткая теория

В отечественной промышленности для определения срока службы полупроводниковых приборов используют стандарт ОСТ11-336.938-83, данный стандарт описывает методику проведения ускоренных испытаний, методику выбора режимов и методику определения энергии активации отказов. Согласно методике, ускоренные испытания для определения срока службы светодиодов предусматривают форсирование, приводящее к интенсификации физико-химических процессов деградации СД без изменения основных механизмов отказов.

Коэффициент ускорения определяется энергией активации отказов ( $E_a$ ).

$$K_y = \exp(E_a / k) \times (1 / (Q_{pn} + 273)) - (1 / (Q_{pny} + 273)), \quad (14)$$

где  $K_y$  – коэффициент форсирования ускоренных испытаний;

$E_a$  – энергия активации отказов, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана;

$Q_{pn}$  – температура р-п перехода в нормальных условиях эксплуатации (в рабочем режиме), °С;

$Q_{pny}$  – температура р-п перехода в ускоренном режиме испытаний, °С.

Номинальное время наработки  $t_{ном}$  (срок службы СД) определяют по уравнению, задав коэффициент форсирования  $K_y$  исходя из режимов ускоренных испытаний:

$$t_{ном} = t_y \times K_y \quad (15)$$

где  $t_y$  – время испытаний в ускоренном режиме. Значение времени наработки в ускоренном режиме не должно быть меньше 1000 часов.

Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 20 июля 2011 г. N 602 г. Москва «Об утверждении требований к осветительным устройствам и электрическим лампам, используемым в цепях переменного тока в целях освещения» светодиодные источники света должны обеспечивать продолжительность горения не менее 25000 часов.

Энергия активации отказов  $E_a$  определяется методом ступенчатых испытаний в соответствии с ОСТ. Результаты обрабатываются по формуле графическим или аналитическим методом:

$$E_a = 8,62 \times 10^{-2} \times ((\ln t_a - \ln t_b) / ((10^3 / T_a) - (10^3 / T_b)), \quad (16)$$

где  $\ln t_a$  и  $\ln t_b$  логарифм времени наработки до отказа в точке (a) и в точке (b),  $T_a$  и  $T_b$  температура р-п перехода в момент отказа СД в точке (a) и в точке (b) на графике линейной регрессии.

Для прогнозирования срока службы СД необходимо провести целый комплекс испытаний. Определить его энергию активации отказов, область допустимого форсирования и провести ускоренные испытания на определение срока службы.

### Задача по практическому занятию № 5

Определить значение прогнозного срока службы светодиода, если значение прямого тока составляет  $I_{np} = 20$  мА, значение прямого напряжения  $U_{np} = 3.2$  В, тепловое сопротивление  $R_t = 150$  К/Вт при температуре эксплуатации  $T_{окр} = 65$  °С, энергией активации 0,75 эВ и срок службы 80 000 часов.

Дано:

$$I_{np} = 20 \text{ мА},$$

$$U_{np} = 3.2 \text{ В},$$

$$R_t = 150 \text{ К/Вт},$$

$$T_{окр} = 65 \text{ °С},$$

$$E_a = 0,75 \text{ эВ},$$

$$t_{ном} = 80 \text{ 000 часов}.$$

Определить:  $t_y$  – срок службы светодиода при  $T_{окр} = 65$  °С.

**Решение:**

Определим температуру  $p$ - $n$  перехода светодиодного кристалла по формуле:

$$Q_{pn} = Q_{окр} + (R_t \times P)$$

где,  $Q_{окр}$  – температура окружающей среды, °С;

$P$  – электрическая мощность (Вт), определяют из уравнения:

$$P = I \times U,$$

$I_{np}$  – прямой ток через светодиодный кристалл, А;

$U_{np}$  – прямое напряжение светодиодного кристалла, В.

$$Q_{pn} = (25 \text{ °С} + 150 \text{ К/Вт} \times 0,064 \text{ Вт}) = 34,6 \text{ °С},$$

$$Q_{pny} = (65 \text{ °С} + 150 \text{ К/Вт} \times 0,064 \text{ Вт}) = 74,6 \text{ °С},$$

Определим коэффициент ускорения по формуле:

$$K_y = \exp(E_a / k) \times (1 / (Q_{pn} + 273)) - (1 / (Q_{pny} + 273))$$

$$K_y = \exp(((0,75 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) / (1,38 \cdot 10^{-22}))) \times ((1 / (34,6 + 273)) - (1 / (74,6 + 273)))$$

$$K_y = 1,38$$

$$t_y = t_{ном} / K_y$$

$$t_y = 80\,000 / 1,38 = 57\,784 \text{ часов.}$$

**Ответ:**

Срок службы светодиода при  $T_{окр} = 65 \text{ °С}$  составил:  $t_y = 57\,784$  часов.

**Индивидуальное задание:**

№	$I_{np}$	$U_{np}$	$R_t$	$T_{окр}$
1	10	3,2	150	30
2	20	3,1	150	30
3	60	3,0	50	30
4	150	2,9	50	30
5	350	3,5	15	30
6	500	3,1	15	30
7	800	3,1	5	30
8	1000	3,1	5	30
9	1500	3,0	5	30
10	2000	3,0	2,5	30

**Определить:**  $t_y$  – срок службы светодиода.

## **Задание на самостоятельную работу № 1 «Инфракрасное излучение»**

### **Краткая теория**

Инфракрасное (ИК) излучение – это электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне от 740 нм (частота 430 ТГц) до 1 мм (частота 300 ГГц). С одной стороны, от ИК излучения расположен диапазон видимого (светового) излучения с длинами волн 380 – 740 нм, с другой стороны, радиоволновое с длинами волн от 1 мм до 100 км.

ИК излучение делится на:

- ближнюю зону с длинами волн от 740 нм до 3 мкм;
- среднюю зону с длинами волн от 3 мкм до 6 мкм;
- дальнюю зону с длинами волн от 6 мкм до 15 мкм;
- сверхдальнюю зону с длинами волн от 15 мкм до 1 мм.

### **Задание на самостоятельную работу № 1**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по ИК-диодам и их применению.

Найдите на ресурсах интернет ИК-диоды с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## **Задание на самостоятельную работу № 2 «Красного цвета свечения»**

### **Краткая теория**

Излучение красного цвета свечения – это электромагнитное излучение с динами волн в диапазоне от 620 нм до 760 нм. С одной стороны, от излучения красного цвета свечения расположено излучение оранжевого цвета свечения 590 – 620 нм, с другой стороны ИК излучение от 760 нм до 1 мм.

Излучение красного цвета свечения в технике используется в навигации аэрокосмического, автомобильного, железнодорожного и водного транспорта. Используется для индикации, отображения информации и сигнализации, в светотерапии, животноводстве и растениеводстве.

Известно, что атмосферные аэрозоли делятся на облака (5 – 50) мкм, туман (1 – 60) мкм при положительной температуре (5 – 15) мкм, при отрицательной температуре (2 – 5) мкм, дымку (0,1 – 5) мкм, осадки, которые могут быть в виде снега (0,1 – 0,35) мм, града (от 1 мм до нескольких сантиметров) и дождя (0,5 – 5) мм.

Известны два основных механизма ослабление оптического сигнала атмосферной средой, это рассеяние, приводящее к изменению направления излучения и поглощение веществами в атмосфере, которое преобразует энергию излучения в другой вид энергии.

Известно, что излучение красного цвета свечения имеет самую большую длину волны в видимой области оптического спектра, соответственно будет меньше рассеиваться при прохождении через атмосферные аэрозоли. В том числе по этой причине источники излучения красного цвета применяются на высотных объектах чтобы сигнализировать об опасности воздушному движению. Светофор красного цвета запрещает движение, у автомобилей красного цвета стоп-сигналы и габаритные фонари. На автомобильной дороге красными светоотражателями обозначается опасность с правой стороны. В водном транспорте красные бакены, буи, вехи и светосигнальные огни красного цвета свечения ограждают опасности судового хода с правой его стороны, т. е. примыкают к правому берегу. Светодиоды красного цвета свечения применяются в RGB дисплеях и архитектурном освещении.

### **Задание на самостоятельную работу № 2**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам красного цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды красного цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

### **Задание на самостоятельную работу № 3 «Оранжевый и жёлтый цвета свечения»**

#### **Краткая теория**

Оранжевый цвет свечения находится в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 590 нм до 620 нм, жёлтый от 560 нм до 590 нм.

Оранжевый и жёлтый цвета свечения в основном используются в иллюминации, и дисплеях. Жёлтый используется в светофорах, в автомобильном транспорте.

#### **Задание на самостоятельную работу № 3**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам оранжевого и жёлтого цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды оранжевого и жёлтого цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## **Задание на самостоятельную работу № 4 «Зелёный цвет свечения»**

### **Краткая теория**

Зелёный цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 560 до 500 нм. Зелёный цвет свечения применяется в навигации, в дисплеях и RGB подсветке для архитектурного и интерьерного освещения.

### **Задание на самостоятельную работу № 4**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам зелёного цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды зелёного цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## **Задание на самостоятельную работу № 5 «Синий цвет свечения»**

### **Краткая теория**

Синий цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 500 до 430 нм. Синий цвет свечения применяется в навигации, например, на аэродроме показывают границы рулёжных дорожек, в дисплеях и RGB подсветке для архитектурного и интерьерного освещения и т.д.

### **Задание на самостоятельную работу № 5**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам синего цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды синего цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## **Задание на самостоятельную работу № 6 «Фиолетовый цвет свечения»**

### **Краткая теория**

Фиолетовый цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 430 до 380 нм. Фиолетовый цвет свечения применяется для архитектурного, интерьерного освещения, в иллюминации и т.д.

### **Задание на самостоятельную работу № 6**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам фиолетового цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды фиолетового цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## Задание на самостоятельную работу № 7 «Ультрафиолетовое излучение»

### Краткая теория

Фиолетовой цвет свечения расположен в оптическом диапазоне электромагнитных волн с длинами от 430 до 380 нм. Фиолетовый цвет свечения применяется для архитектурного, интерьерного освещения, в иллюминации и т.д.

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по диодам фиолетового цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет диоды фиолетового цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

Ультрафиолетовое излучение (10 – 380) нм можно разделить на четыре группы: ближний (длинноволновый) (400 – 300) нм, средний (средневолновый) (300 – 200) нм, дальний (коротковолновый) (200 – 122) нм, экстремальный (121 – 10) нм. Ультрафиолетовое излучение применяется для полимеризации материалов в технологических процессах и для дезинфекции. К бактерицидному излучению относится электромагнитное излучение УФ диапазона длин волн в интервале от 205 до 315 нм. На Рис. 1 приведена кривая относительной спектральной бактерицидной эффективности излучения.

Доза ультрафиолетового облучения необходимая для инактивации 99,9% различных видов микроорганизмов: *Shigella flexneri* – 5,2 мДж/см<sup>2</sup>; *Salmonella typhi* – 7,5 мДж/см<sup>2</sup>; *Shigella dysenteriae* – 8,8 мДж/см<sup>2</sup>; *Proteus vulgaris* – 7,8 мДж/см<sup>2</sup>; *Staphylococcus aureus* – 7,8 мДж/см<sup>2</sup>; *Escherichia coli* – 6,0 мДж/см<sup>2</sup>; *Virus poliomyelitis* – 6,0 мДж/см<sup>2</sup>; *Salmonella paratyphi* – 6,1 мДж/см<sup>2</sup>; *Vibrio cholerae* – 6,5 мДж/см<sup>2</sup>; *Orthomyxoviridae* (вирусы гриппа) – 6,6 мДж/см<sup>2</sup>; *Salmonella enteritidis* – 7,6 мДж/см<sup>2</sup>; *Mycobacterium tuberculosis* – 10,0 мДж/см<sup>2</sup>; *Pseudomonas aeruginosa* – 10,5 мДж/см<sup>2</sup>; *Virus hepatitis A* – 11,0 мДж/см<sup>2</sup>.

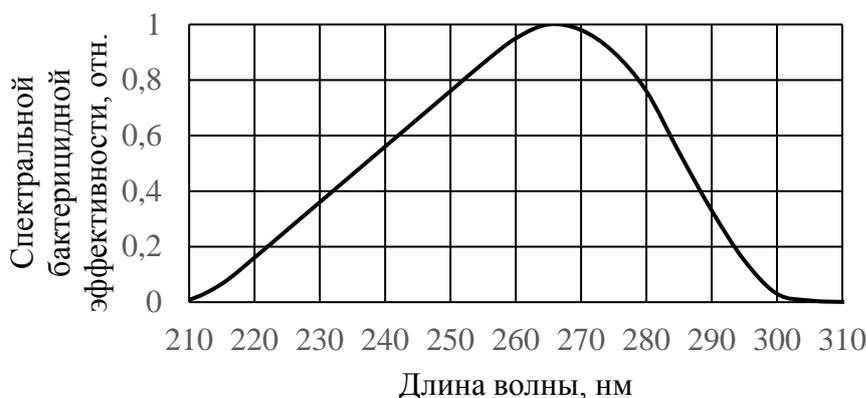


Рисунок 1 – Кривая относительной спектральной бактерицидной эффективности  
Поверхностная бактерицидная доза облучения (экспозиция) ( $H$ ), мДж/см<sup>2</sup>, определяется по формуле 4:

$$H = E \times t, \quad (17)$$

где,  $E$  – бактерицидная облучённость поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $t$  – времени облучения, с.

Бактерицидная облучённость поверхности определяется по формуле 5:

$$E = I_e / r^2, \quad (18)$$

где,  $I_e$  – силы бактерицидного излучения, Вт/ср;

$r$  – расстояние от источника излучения до облучаемой поверхности, м.  
Сила бактерицидного излучения определяется по формуле б:

$$I_e = \Phi_e / \Omega \quad (19)$$

где,  $\Phi_e$  – бактерицидный поток излучения, Вт;  
 $\Omega$  – телесный (объемный) угол.

В настоящее время с точки зрения бактерицидной эффективности, наиболее эффективными являются УФ-диоды NCSU334B-E производства Nichia (Рис. 2).

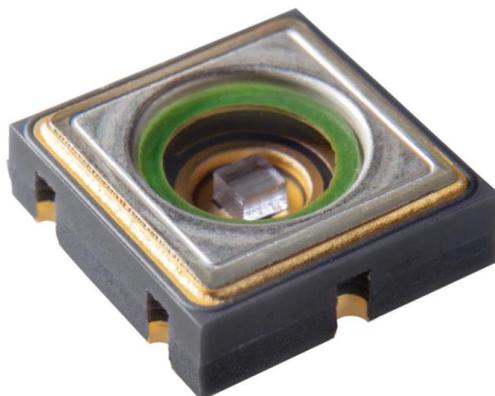


Рисунок 32 – УФ-диоды NCSU334B-E производства Nichia

УФ-диоды NCSU334B-E производства Nichia: длина волны 275-280 нм, потребляемая мощность 2,275 Вт, угол излучения 120 градусов, поток излучения 77 мВт, соответственно КПД = 34 %.

#### **Задание на самостоятельную работу № 7**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по УФ-диодам и их применению.

Найдите на ресурсах интернет УФ-диоды с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## Задание на самостоятельную работу № 8 «Светодиоды белого цвета свечения»

### Краткая теория

Известно, что для того чтобы человек воспринимал электромагнитное излучение оптического спектра как белый цвет, необходимо задействовать два рецептора человеческого глаза. Т.е., достаточно смешать излучение синего цвета с жёлтым. На практике важен не только факт получения белого цвета, но и качество этого цвета. Качественными характеристиками источников белого цвета являются индекс цветопередачи, цветовая температура и координаты цветности.

Способность источника излучения передавать все цвета освещаемого объекта определяется его индексом цветопередачи (CRI). Цветовая температура – это такая температура черного тела, при которой его энергетическая светимость равна энергетической светимости данного источника.

В современных светодиодах, в большинстве случаев используют кристалл синего цвета свечения и фотолуминофор жёлтого свечения с полушириной спектра порядка 110 нм. Это наиболее эффективный и дешёвый метод, т.к. КПД фотолуминофора на основе YAG и YGG достигает 90%. Для повышения индекса цветопередачи используют смесь люминофоров. В качестве базового используют люминофоры типа YAG или YGG и добавляют в композицию красные и зелёные люминофоры (нитридные и силикатные).

Люминофор представляет собой порошок с частицами размерами 6 – 15 мкм. Частицы люминофора состоят из кристаллов ((Y1-a Gd) Al5 O12 × Ce3+ (YGG)). Кристаллическая решетка YAl5O12 активирована атомами Ce. Gd позволяет сместить максимум спектра излучения в длинноволновую область, Ga в коротковолновую, к тому же Ga повышает временную стабильность люминофора. YGG (YAG) имеет неравновесные состояния кристаллической решетки и при воздействии излучения с длиной волны 450 – 465 нм электроны возбуждаются на высокие энергетические уровни, а затем переходят на равновесные с выделением энергии путём излучения фотона.

Два основных механизма работы люминофора:

1. Поглощение излучения люминесцентными центрами (активаторами и примесями) – переход электронов на более высокие энергетические уровни либо отрыв электрона от активатора, что приводит к образованию дырки.

2. Поглощение основой люминофора – образуются электроны и дырки. Дырки могут мигрировать по кристаллу и локализоваться на центрах люминесценции. Излучение происходит при возвращении электрона на более низкие энергетические уровни или при рекомбинации электронов и дырок. Ширина запрещённой зоны может составлять 1 – 10 эВ.

Для нанесения люминофора в светодиод используют связующие компоненты. Такими компонентами являются оптически прозрачные компаунды на основе силикона или эпоксидной смолы, а также пластины из поликарбоната.

Как правило, квантовый выход из композиции люминофора и связующего компонента, в котором он растворён, выше в твёрдых растворах, чем в жидких, так как с повышением вязкости уменьшается вероятность безызлучательных процессов возбуждения через внутреннюю конверсию. Но в твёрдых растворах возможен эффект поляризации так как частицы люминофора «зажаты» между упорядоченными молекулами растворителя.

Для люминофора характерно температурное тушение и концентрационное.

У люминофоров YGG (YAG) ширина запрещенной зоны достигает более 3.8эВ, а основа люминофора имеет показатель преломления  $1,50 \leq n_{fl} \leq 1,85$ . Люминофоры, удовлетворяющие таким условиям, предпочтительно использовать для изготовления светодиода белого свечения.

Герметизация светодиода может осуществляться по четырём основным

технологиям (Рис. 33):

1. Отражатель с кристаллом светодиода до краёв заполняют смесью люминофора и компаунда.
2. Люминофор наносят непосредственно на поверхность кристалла.
3. Отражатель с кристаллом заполняют прозрачным компаундом и на его поверхности или в верхней части отражателя наносят слой смеси люминофора и компаунда.
4. На пути вывода излучения светодиода синего свечения ставят пластину с люминофором, при этом между светодиодом и пластиной существует воздушный зазор.

#### **Задание на самостоятельную работу № 8**

Изучить современную научно-техническую, нормативную, методическую литературу по светодиодам белого цвета свечения и их применению.

Найдите на ресурсах интернет светодиоды белого цвета свечения с потребляемой мощностью 1 – 3 Вт и рассчитайте КПД и световую отдачу. Найдите аналогичные светодиоды Российского производства.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.
2. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diod (Springer, Berlin). – 1997. – С. 335.
3. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках / пер с англ. Ж. Панков; под ред. Ж.И. Алфёрова и В.С. Вавилова – М.: Мир, 1973. – 456 с.
4. Коган Л.М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
5. Берг А., Дин П. Светодиоды // Пер с англ. А. Э. Юнович. – М.: Мир, 1979. – 687 с.
6. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. Пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
7. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова и др.; под. ред. Л.П. Варфоломеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 стр.
8. Мешков В.В. Основы светотехники, ч.1 – М.: Энергия, 1979.
9. Мешков В.В., Матвеев А.Б, Основы светотехники, Ч-2. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Bakin N.N., Yauk E.F., Tuyev V.I. LED LIGHTING // В сборнике: 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2011 - Proceedings – 2011. – С.346-348.
11. Сошин Н.П. Новые люминофоры для эффективных приборов твердотельного освещения. Круглый стол производство светодиодов в россии – дорожная карта. Материалы доклада. Москва 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprpss.ru/sobytiya/vystavki-i-konferencii/kruglyj-stol-proizvodstvo-svetodiodov-v-rossii-dorozhnaya-karta.html>, свободный (дата обращения: 29.03.2022).
12. Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках // Вестник Томского государственного университета. – 2005. - №285. – С. 95-102.
13. Градобоев А.В., Асанов И.А., Скакова И.М. Стойкость светодиодов на основе InGaN/GaN при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – 2011. – С.100-102.
14. Вилисов А.А., Ремнёв Г.Е., Линник С.А., Солдаткин В.С., Тепляков К.В. Светодиод с CVD алмазным теплоотводом // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – № 8/3. – С. 169-171.
15. Вилисов А.А., Линник С.А., Ремнёв Г.Е., Солдаткин В.С., Тепляков К.В. Применение поликристаллического CVD алмаза для эффективного отвода тепла в мощных светодиодах // 9-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2013. – С.180-181.
16. Вилисов А. А., Васильева М. А., Дохтуров В. В., Солдаткин В.С., Тепляков К. В. Зависимость световых параметров светодиодов белого свечения от люминофоров // XLIX Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» в Новосибирском научном центре Сибирского отделения РАН на базе Новосибирского Государственного Университета, г. Новосибирск. – 2011. – 1 с.
17. Вилисов А.А., Гарипов И.Ф., Дохтуров В.В., Короченко Д.И., Курило Ю.М., Солдаткин В.С., Тепляков К.В., Токарев А.В. Светодиоды для поверхностного монтажа // 8-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» . – 2011. – С.15.
18. Вилисов А.А., Дохтуров В.В., Тепляков К.В., Солдаткин В.С. Индикаторные светодиоды для поверхностного монтажа // Полупроводниковая светотехника. - 2011. - Т. 5. - № 13. - С. 50-51.

19. Вилисов А., Калугин К., Солдаткин В., Перминова Е. Белые светодиоды // Полупроводниковая светотехника. - 2012. Т. - 4. - № 18. - С. 14-17.
20. Вилисов А.А., Солдаткин В.С., Тепляков К.В., Устюгов С.Н. Разработка мощных светодиодов белого цвета свечения для поверхностного монтажа // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2012». – 2012 – Т. 2. – 2с.
21. Вилисов А.А., Екимова И.А., Солдаткин В.С., Туев В.И. Люминофор для светодиода // Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2013». – 2013 – Т. 2. – С. 63-65.
22. Гончарова Ю.С., Гарипов И.Ф., Солдаткин В.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность // Доклады ТУСУРа. – 2013. – №2. – С. 51-53.
23. Солдаткин В.С., Вилисов А.А., Градобоев А.В., Асанов И.А., Тепляков К.В. Стойкость GaN-светодиодов к облучению нейтронами // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2012. - Т. 55. - № 9-2. - С. 290-291.
24. Asanov I.A., Vilisov A.A., Gradoboev A.V., Soldatkin V.S., Tepljakov K.V. Firmness of light-emitting diodes for the superficial installation of white colour of the luminescence to action of factors of radiative action // 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High-Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. - 2012 – С. 111-112.
25. Вилисов, А. А. Светодиоды и светотехнические устройства: Учебное пособие [Электронный ресурс] / А. А. Вилисов, В. С. Солдаткин, В. И. Туев. — Томск: ТУСУР, 2020. — 112 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/9304> (дата обращения: 29.03.2022).