

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»
(ТУСУР)**

**Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий каф. РЭТЭМ

_____ В.И. Туев

« ____ » _____ 2017 г.

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ,
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ**

Методические указания по практической
работе магистрантов для направления подготовки
11.04.03– Конструирование и технология электронных средств,

Разработали:

Доцент каф. РЭТЭМ

_____ В.С. Солдаткин

Магистрант каф. ЭП

_____ В.С. Каменкова

Солдаткин В.С., Каменкова В.С.. Технология изготовления светодиодных кристаллов, Полупроводниковые наногетероструктуры: Методические указания по практической работе студентов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 18 с.

Настоящее методическое указание по практической работе студентов составлены с учетом требований Федерального Государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств». Методическое указание по практической работе предназначено для магистрантов, изучающих специальные дисциплины «Технология изготовления светодиодных кристаллов», «Полупроводниковые наногетероструктуры» и содержит список тем, отводимых на практическое изучение. В изучении материалов данных методических указаний, магистранты должны расширить свои знания по изучаемым дисциплинам, а также данное методическое указание направлено на формирования у магистрантов следующих знаний, умений и навыков:

знать Методы получения полупроводникового материала, методы формирования омических контактов и методы контроля параметров светодиодных кристаллов; методы изготовления и контроля основных параметров полупроводниковых наногетероструктур мировые достижения в данной области;

уметь Осуществлять контроль параметров светодиодных кристаллов; контролировать и анализировать основные электрические, оптические и механические параметры полупроводниковых наногетероструктур;

владеть Навыками контроля параметров светодиодных кристаллов; навыками контроля и анализа основных параметров полупроводниковых наногетероструктур, сопоставления параметров с мировыми достижениями в данной области и оценку применимости в технологическом процессе изготовления светодиодных кристаллов и светодиодов на их основе.

Оглавление

1. ЗАДАЧИ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	4
2. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	17

1. ЗАДАЧИ ПО ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Задача №1

Кинетическая энергия электрона равна 1,02 МэВ. Вычислить длину волны де Бройля этого электрона.

Дано:

$$E_k = 1,02 \text{ МэВ} = 16,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж},$$

$$E_0 = 0,51 \text{ МэВ} = 8,1 \cdot 10^{-14} \text{ Дж},$$

Определить:

Длину волны де Бройля λ .

Решение:

Длина волны де Бройля определяется по формуле $\lambda = h/p$, (1) где λ — длина волны, соответствующая частице с импульсом p , h — постоянная Планка. По условию задачи кинетическая энергия электрона больше его энергии покоя: $E_k = 2E_0$, (2) следовательно, движущийся электрон является релятивистской частицей. Импульс релятивистских частиц определяется по формуле

$$p = \left(\frac{1}{c}\right) \sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}, \quad (3)$$

или, учитывая соотношение (2),

$$p = \left(\frac{1}{c}\right) \sqrt{E_k(E_k + E_k)} = E_k \sqrt{2/c}; \quad (4)$$

Подставляя (4) в (1), получим

$$\lambda = hc / (E_k \sqrt{2}).$$

Производя вычисления, получим

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{16,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \sqrt{2}} = 0,87 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Ответ

$$\lambda = 0,87 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Индивидуальное задание

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_k,$ Дж	$2,05 \cdot 10^{-14}$	$12,8 \cdot 10^{-14}$	$8,17 \cdot 10^{-14}$	$11,5 \cdot 10^{-14}$	$16,02 \cdot 10^{-14}$	$9,61 \cdot 10^{-14}$	$8,01 \cdot 10^{-14}$	$4,8 \cdot 10^{-14}$	$14,4 \cdot 10^{-14}$
$E_0,$ Дж	$3,2 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	$0,8 \cdot 10^{-14}$	$1,28 \cdot 10^{-14}$	$0,96 \cdot 10^{-14}$	$1,12 \cdot 10^{-14}$	$3,2 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$

Определить длину волны де Бройля λ

Задача №2

Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300К, если известно, что ширина запрещенной зоны $\Delta E = 0,665$ эВ, а эффективные массы плотности состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны: $m_v = 0,388 m_0$; $m_c = 0,55 m_0$, где m_0 – масса свободного электрона.

Решение:

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением:

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = E_i + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$

где E_i – уровень, соответствующий середине запрещенной зоны; N_c , N_v – эффективная плотность состояний для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно.

$$N_v = \frac{2(2\pi m_v kT)^{3/2}}{h^3}, \quad N_c = \frac{2(2\pi m_c kT)^{3/2}}{h^3},$$

Подставляя значения физических констант k , h , m_0 , а также температуру, получим:

$$N_v = 6,04 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}, \quad N_c = 1,02 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

Таким образом,

$$E_F - E_i = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} \ln \frac{6,04 \cdot 10^{24}}{1,02 \cdot 10^{25}} = -1,08 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} = -6,78 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$$

Из-за малых значений энергия в физике полупроводников, как правило, вычисляется в электрон-вольтах (эВ). $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$.

Таким образом, уровень Ферми в собственном германии при комнатной температуре расположен на 6,78 мэВ ниже середины запрещенной зоны.

Индивидуальное задание

материал	ΔE , эВ	T , К	m_v	m_c
Si	1,12	295	1.08	0.56
GaAs	1.424	300	0,067	0,45
InSb	0.17	300	0.013	0.6
ZnSe	2.68	295	0.17	1.44
ZnO	3.37	300	0.19	1.44

Найти положение уровня Ферми

Задача №3

Рассчитать общий индекс цветопередачи R_a теплобелых с $T_{цв} = 2700K$ и белых с $T_{цв} = 4100K$ светодиодов, если их специальные индексы цветопередачи R_i восьми образцов МКО соответственно составляют:

$$\text{- тепло-белые СД с } T_{цв} = 2700K \sum_{i=1}^8 R_i = 600$$

$$\text{- белые СД с } T_{цв} = 4100K \sum_{i=1}^8 R_i = 664$$

Определить к какому классу по требованиям к цветопередаче относятся данные светодиоды и оценить качество их цветопередающих свойств.

Решение:

Цветопередача – влияние источников света на восприятие цвета материального объекта. Проблема оценки качества воспроизведения цвета в архитектуре интерьера и города особенно актуальна в связи с широким использованием различающихся по цветовым характеристикам искусственных источников белого света – тепловых, разрядных, полупроводниковых

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$

$$R_a = \frac{1}{8} \cdot 600 = 75$$

$$R_a = \frac{1}{8} \cdot 664 = 83$$

Таким образом, общий индекс цветопередачи тепло-белого светодиода составил 75% а индекс цветопередачи белого светодиода составил 83%. По таблице 1 отмечаем, что тепло-белый источник относится ко 2 группе по значению общего индекса цветопередачи, что характеризует его цветопередающие свойства среднего качества. Теплый же источник света относится к 1В группе по назначению общего индекса цветопередачи, что так

же как и у тепло-белого характеризует его цветопередающие свойства среднего качества.

Таблица 1

Цветность и группы цветопередачи

Цветовая температура, К	Цветовая гамма
ниже 3300К	теплая
от 3300К до 5000К	нейтральная
выше 5000К	холодная
Группа цветопередачи	Общий индекс цветопередачи Ra в системе МКО
1А	$Ra \geq 90$
1В	$90 \geq Ra \geq 80$
2	$80 \geq Ra \geq 60$
3	$60 \geq Ra \geq 40$
4	$40 \geq Ra \geq 20$

Индивидуальное задание

№	$T_{\text{цв}}, \text{K}$
1	2950 $\sum_{i=1}^8 R_i = 624$
2	3500 $\sum_{i=1}^8 R_i = 656$
3	3150 $\sum_{i=1}^8 R_i = 632$
4	3370 $\sum_{i=1}^8 R_i = 648$

Рассчитать общий индекс цветопередачи R_a . Определить к какому классу по требованиям к цветопередаче относятся данные светодиоды и оценить качество их цветопередающих свойств.

Задача №4

Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии Si при комнатной температуре $T = 300\text{K}$ и температуре жидкого азота $T = 77\text{ K}$.

Решение:

Концентрация собственных носителей заряда n_i имеет сильную температурную зависимость и определяется как

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

где эффективная плотность состояний в C - и V - зонах $N_{C,V}$ также зависит от температуры T и эффективной массы носителей заряда в зоне m^* :

$$N_{C,v} = 2 \cdot \left(2\pi \cdot \frac{m^*kT}{h^2}\right)^{3/2} = 2,5 \cdot 10^{19} \cdot \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}, \text{ см}^{-3}$$

Ширина запрещенной зоны E_g имеет слабую зависимость от температуры типа $E_g = E_{g0} - \alpha T$. Величины E_{g0} и α приведены в таблице 2, здесь же можно найти величины N_C и N_V при $T = 300\text{ K}$. Расчет значений эффективной плотности состояний в C - и V -зонах и концентрации собственных носителей заряда n_i при температуре жидкого азота 77 K приводится ниже

Таблица 2

	Si	Ge	GaAs	InSb
$N_C, \text{ см}^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{15}$
$N_V, \text{ см}^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$6,9 \cdot 10^{18}$	$9,8 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{18}$
$N_i, \text{ см}^{-3}$	$3 \cdot 10^{-20}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$	$1,2 \cdot 10^{10}$

Примесь полностью ионизована, когда концентрация равновесных электронов равна концентрации легирующей примеси $n_0 = N_D$. Из основного соотношения для полупроводников: $n_0 p_0 = n_i^2$ найдем концентрацию неосновных носителей заряда $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$. Для Si $p_0 = 2,6 \cdot 10^3$.

Индивидуальное задание

№	$T_{\text{окр}}, \text{K}$	T_N, K
1	283	75
2	305	72
3	315	69
4	325	66
5	333	64
6	337	58
7	343	56
8	353	53

Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии Si, германии Ge, арсениде галлия GaAs и антимониде индия InSb.

Задача №5

Найти объемное положение уровня Ферми φ_0 в германии Ge марки ГДА– 10 при температуре $T = 300$ К.

Решение:

В легированном полупроводнике $p_0 \gg n_i$ положение уровня Ферми φ_0 можно рассчитать по формуле

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_0}{n_i} \right)$$

Концентрацию основных носителей p_0 найдем, зная величину удельного сопротивления $\rho = 10$ Ом. см, как

$$p_0 = \frac{1}{q\mu\rho}$$

В результате: $p_0 = 3,3 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $\varphi_0 = 0,067$ эВ.

Индивидуальное задание

№	T, K
1	283
2	305
3	315
4	325
5	333
6	337
7	351

Найти объемное положение уровня Ферми φ_0 в кремнии (Si), арсениде галлия (GaAs) и антимониде индия (InSb).

Задача №6

Эффективность преобразования внешней (электрической) мощности планарного GaAs светодиода η равна 1,5 % при прямом токе $I = 50$ мА и разности потенциалов $U = 2$ В. Оценить генерируемую прибором оптическую мощность P_i , если коэффициент отражения R на границе GaAs – воздух равен $R = 0,8$. Коэффициент преломления GaAs $n = 3,6$.

Решение:

Доля излучаемого света через лицевую поверхность светодиода F и коэффициент отражения R определяются:

$$F = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2\right]; \quad R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$$

$P_0 = F \cdot P_i$ – внешняя мощность (P_i – внутренняя мощность);

$$P_0 = \eta \cdot I \cdot V; \quad P_i = \frac{\eta \cdot I \cdot V}{F}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{4 \cdot (3,6)^2}{\left(1 - \left(\frac{2,4}{4,6}\right)^2\right)} = 71,23$$

$$P_i = 0,015 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 71,23 = 0,106845 = 107 \text{ мВт.}$$

Индивидуальное задание

GaN светодиод			
I , мА	U , В	R	n
20	3,9	0,6	2,4
30	2,9	0,5	2,3
50	3,5	0,7	2,4
30	3,8	0,9	2,5
20	4,4	0,8	2,49
30	4	0,5	2,3
20	3,8	0,6	2,5

Оценить генерируемую прибором оптическую мощность P_i .

2. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Светодиоды : Пер. с англ. / А. И. Берг, П. Дин; Ред. и предисл. А. Э. Юнович. - М. : Мир, 1973. - 98[2] с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 4 экз.)
2. Физика полупроводниковых приборов : пер. с англ.: В 2 кн. / С. М. Зи; Пер. В. А. Гергель, Пер. Н. В. Зыков, Пер. Р. З. Хафизов, Ред. Пер. Р. А. Сурис. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Мир, 1984 - Кн. 2. - М. : Мир, 1984. - 456 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 15 экз.)
3. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: Учебное пособие / Туев В. И., Солдаткин В. С., Вилисов А. А., Старосек Д. . - 2016. 48 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6600>, свободный.
4. Физические основы оптоэлектроники: Учебное пособие имеет гриф СибРУМЦ «Для межвузовского использования» / Давыдов В. Н. - 2016. 139 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/5963>, свободный.
5. Полупроводниковая светотехника: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 211000.62 – Конструирование и технология электронных средств / Туев В. И., Солдаткин В. С., Вилисов А. А. - 2015. 46 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/5458>, свободный.
6. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике: Коллективная монография / Российская Академия наук, Сибирское отделение, Институт физики полупроводников; ред. А.Л. Асеев. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 367 (наличие в библиотеке ТУСУР - 10 экз.)
7. Интегральные устройства радиоэлектроники. Часть 1. Основные структуры полупроводниковых интегральных схем: Учебное пособие / Романовский М. Н. - 2012. 123 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1304>, свободный.

8. Единая система технологической документации: Справочное пособие / Е.А. Лобода, В.Г. Мартынов, Б.С. Мендриков и др. – М.: Издательство стандартов, 1992. - 325 с. (наличие в библиотеке ТУСУР - 5 экз.)

9. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий, технологии корпусирования светодиодов белого цвета: Методические указания по практической и самостоятельной работе / Солдаткин В. С., Туев В. И., Вилисов А. А., Каменкова В. С. - 2016. 19 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6616>, свободный.

10. Технология сборки и монтажа мощных светоизлучающих изделий: Учебно- методические указания для выполнения лабораторных работ для магистрантов / Солдаткин В. С., Вилисов А. А., Туев В. И. - 2016. 16 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/6584>, свободный.

11. Методы и оборудование контроля параметров технологических процессов производства наногетероструктур и наногетероструктурных монолитных интегральных схем: Учебное пособие / Смирнов С. В. - 2010. 115 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/535>, свободный.

12. Матухин В.Л., Ермаков В.Л. Физика твердого тела: Учебные пособия. - СПб.: Издательство "Лань", 2010. - 224 с. [Электронный ресурс]. - <https://e.lanbook.com/reader/book/262/#4>

13. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: Учебное пособие. - СПб.: Издательство "Лань", 2011. - 544 с. [Электронный ресурс]. - <https://e.lanbook.com/reader/book/684/#4>

14. Нанoeлектроника: Учебное пособие / Сахаров Ю. В., Троян П. Е. - 2010. 88 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://edu.tusur.ru/publications/537>, свободный.