

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

*Методические указания к лабораторной работе по физике № 45
для студентов всех направлений бакалавриата всех форм обучения*

Самостоятельное учебное электронное издание

Издание 2-е, переработанное

СЫКТЫВКАР 2014

УДК 53
ББК 223
И32

Рассмотрены и рекомендованы к переизданию в электронном виде
кафедрой автоматизации технологических процессов и производств
Сыктывкарского лесного института.

Утверждены к переизданию в электронном виде
советом технологического факультета Сыктывкарского лесного института.

Составители:

ст. преподаватель **Л. С. Полугрудова**,
ст. преподаватель **Е. В. Илюшенко**

Отв. редактор:

доктор физико-математических наук, профессор **Ф. Ф. Асадуллин**

Рецензент:

доктор геолого-минералогических наук **О. Б. Котова**
(Институт геологии Коми НЦ УрО РАН)

И32 Изучение вентильного фотоэлемента [Электронный ресурс] : метод. указания к лаб. работе по физике № 45 для студ. всех напр. бакалавриата всех форм обуч. : самост. учеб. электрон. изд. : изд. 2-е, перераб. / Сыкт. лесн. ин-т ; сост. Л. С. Полугрудова, Е. В. Илюшенко. – Электрон. дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2014. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

В методических указаниях приведены теоретическая и экспериментальная части по данной лабораторной работе. Для самоподготовки даны списки контрольных вопросов и рекомендуемой литературы.

Первое издание опубликовано в 2006 г.

УДК 53
ББК 223

Темплан I полугодия 2014 г. Изд. № 2.

Самостоятельное учебное электронное издание

Составители: **Полугрудова** Людмила Степановна, **Илюшенко** Елена Вячеславовна

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

Электронный формат – pdf. Разрешено к публикации 18.06.14. Объем 0,5 уч.-изд. л.
Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (СЛИ),
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39, institut@sfi.komi.com, www.sli.komi.com
Редакционно-издательский отдел СЛИ. Заказ № 67.

© СЛИ, 2006
© СЛИ, 2014

© Л. С. Полугрудова, Е. В. Илюшенко, составление, 2006
© Л. С. Полугрудова, Е. В. Илюшенко, составление, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	9
Методика выполнения работы	9
Порядок выполнения работы.....	10
ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ	11
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	12
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	13

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 45

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭЛЕМЕНТА

Цель работы: изучение вентильного и внутреннего фотоэффектов, экспериментальное изучение зависимости фотоЭДС и фототока от освещенности; определение интегральной чувствительности фотоэлемента.

Задачи работы: получение экспериментальных данных для расчета зависимости фототока от освещенности и интегральной чувствительности.

Обеспечивающие средства: прибор лабораторный для изучения законов фотометрии, микроамперметр на 100 мкА, вольтметр (или милливольтметр) с пределом до 0,5 В; лампочка на подставке, источник питания.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Различают фотоэффект внешний, внутренний и вентильный.

Внешний фотоэффект — это испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Наблюдается в твердых телах, а также в газах на отдельных атомах и молекулах (фотоионизация).

Внутренний фотоэффект — это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика из связанных состояний в свободные без вылета наружу. В результате концентрация носителей тока внутри тела увеличивается, это приводит к повышению электропроводимости или к возникновению ЭДС.

Вентильный фотоэффект — возникновение ЭДС (фотоЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла.

Внутренний фотоэффект имеет место в полупроводниках. Напомним, что любой кристалл, в том числе и кристалл полупроводника, представляет собой квантовую систему, поэтому энергия электронов в нем может принимать только те значения, которые попадают в одну из разрешенных зон.

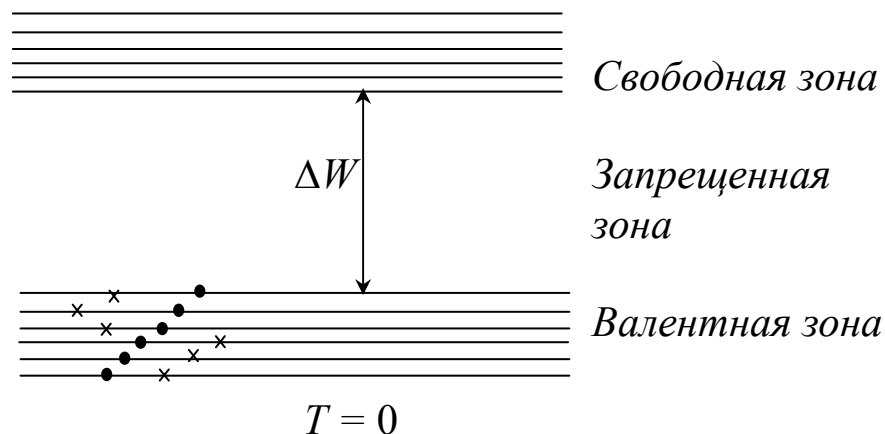


Рис. 1

На каждом энергетическом уровне зоны, в соответствии с принципом Паули, может находиться не больше двух электронов, причем спины этих электронов должны быть антипараллельны. На рис. 1 такие два электрона изображены условно — один точкой (острие стрелки), а другой крестиком (хвост стрелки). Энергетический интервал, отделяющий одну разрешенную зону от другой, называется *запрещенной зоной*.

При $T = 0$ К в полупроводнике есть ряд полностью заполненных зон, самая высокая из которых носит название *валентной*, потому что на ее уровнях находятся валентные электроны. Выше валентной расположена незаполненная разрешенная зона, на энергетических уровнях которой при $T = 0$ К электронов нет (*свободная зона*). Энергетический промежуток ΔW , отделяющий эту зону от валентной, равен ширине запрещенной зоны (рис. 1).

Когда $T > 0$ К, частицы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, совершают тепловое колебательное движение около положений равновесия; мерой средней энергии этого движения служит величина kT (здесь k — постоянная Больцмана). При взаимодействии электрона с узлом решетки последний может передать ему всю или часть своей энергии.

Ширина запрещенной зоны в полупроводниках составляет величину порядка нескольких десятков kT при $T = 300$ К (область комнатной температуры). Взаимодействие электрона с узлом решетки, обладающим энергией $W > kT$, приводит к перебросу его из валентной зоны в свободную. Очевидно, что чем выше температура, тем больше вероятность взаимодействия электрона с таким узлом, который обладает достаточно большой энергией, и,

следовательно, тем большее число электронов оказывается в свободной зоне.

Энергия, которую может приобрести электрон под действием электрического поля, много меньше ширины запрещенной зоны. Поэтому при $T = 0$ К полупроводник не проводит электрический ток, т. е. ведет себя как диэлектрик. Однако энергия, которую приобретает электрон на длине свободного пробега, оказывается достаточной для перевода электрона с одного уровня на другой в пределах одной и той же зоны. Следовательно, при $T > 0$ К электроны, попавшие в свободную зону, где есть множество очень близких вакантных уровней (рис. 2), могут ускоряться электрическим полем и участвовать в переносе тока. Поэтому свободную зону называют *зоной проводимости*, а попавшие в нее электроны — *электронами проводимости*.

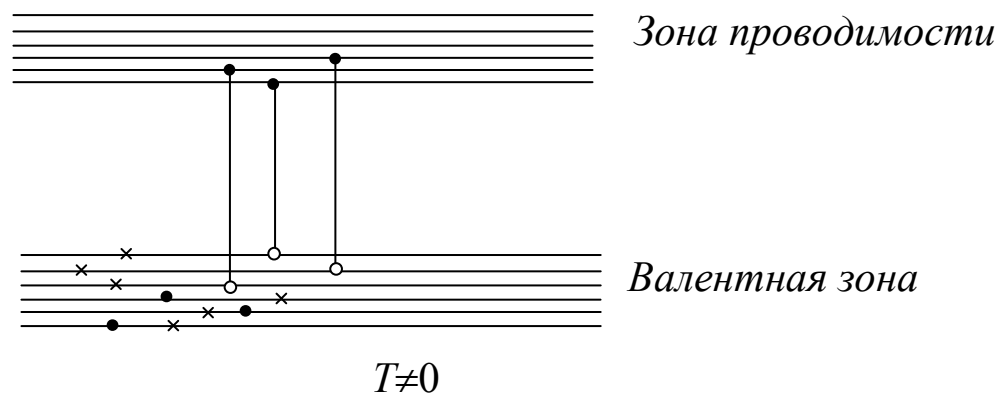


Рис. 2

Под действием электрического поля электроны переходят в зоне проводимости с более низких на более высокие энергетические уровни. Таким образом, перемещение электрона проводимости в теле кристалла в направлении градиента потенциала на энергетической схеме отражается перемещением его по зоне проводимости вверх.

Уход электрона из валентной зоны сопровождается появлением в ней вакантного (свободного) места, получившего название *дырки*. Электроны валентной зоны под действием электрического поля способны также совершать внутризонные переходы. Такие переходы возможны, очевидно, только на те уровни, где образовались дырки. В результате этих переходов дырки начинают перемещаться в пределах валентной зоны вниз. В кристалле дырка

перемещается под действием электрического поля в направлении противоположном перемещению электрона; перемещение ее по своим результатам равносильно перемещению положительного заряда. Это позволяет рассматривать дырки как квазичастицы, несущие на себе положительный заряд.

В идеально чистом полупроводнике концентрации дырок и свободных электронов одинаковы. Проводимость в равной степени обуславливается обоими типами зарядов и носит название *собственной*. Введение примеси меняет характер проводимости.

Примеси бывают двух родов — донорные и акцепторные. Атомы *донорной примеси* имеют валентность бóльшую, чем атомы кристалла полупроводника. Введение донорной примеси приводит к появлению на энергетической схеме добавочного локального уровня вблизи дна зоны проводимости. На этом уровне находятся валентные электроны атомов примеси. Для ионизации этих атомов нужна энергия $\Delta W'$, много меньшая ширины запрещенной зоны (рис. 3).

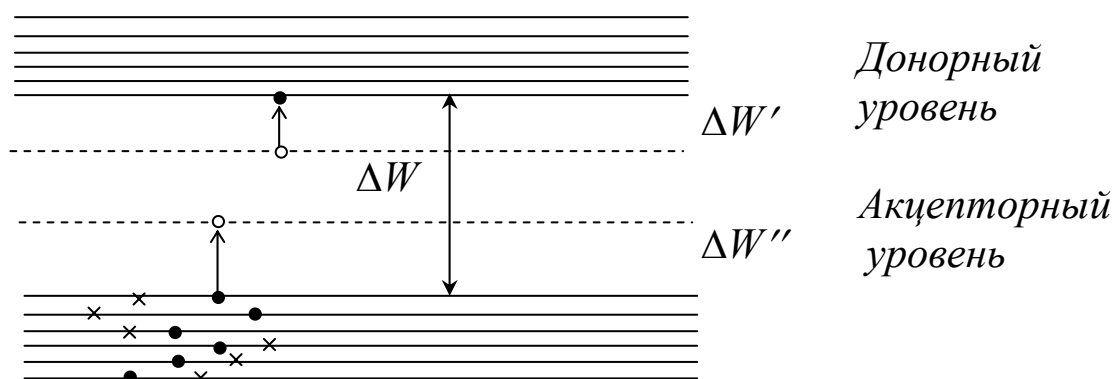


Рис. 3

Поэтому концентрация электронов проводимости $n_э$ резко повышается и становится много больше концентрации дырок $n_д$. Полупроводник, у которого основными носителями тока являются электроны ($n_э \gg n_д$), называется *электронным*, или *полупроводником n-типа*.

Примесь называется *акцепторной*, если она увеличивает концентрацию дырок в кристалле. В этом случае дырки становятся основными носителями тока ($n_д \gg n_э$), и полупроводник называют *дырочным*, или *полупроводником p-типа*. Атомы акцепторной примеси имеют валентность меньшую, чем основные атомы кристалла. Введение акцепторной примеси, как видно из рис. 3,

отражается на энергетической схеме появлением локального уровня вблизи потолка валентной зоны. Он соответствует первому возбужденному уровню атомов примеси и поэтому свободен. Переход на него электронов из валентной зоны приводит к резкому увеличению концентрации дырок.

Возникновение в полупроводнике носителей тока (электронов проводимости и дырок) может осуществляться не только за счет поглощения тепловой энергии, но и за счет других видов энергии, например световой. Однако оптическое возбуждение возможно только в том случае, когда полупроводник подвергается воздействию электромагнитного излучения, энергия квантов которого ($\varepsilon = h\nu$) достаточно велика, здесь h — постоянная Планка, ν — частота излучения.

Фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, называются полупроводниковыми фотоэлементами, или *фотосопротивлениями*.

На внутреннем фотоэффекте основана еще одна разновидность фотоэлемента — полупроводниковый фотоэлемент с запирающим слоем, или *вентильный фотоэлемент*.

В данной работе применяется селеновый фотоэлемент (рис. 4).

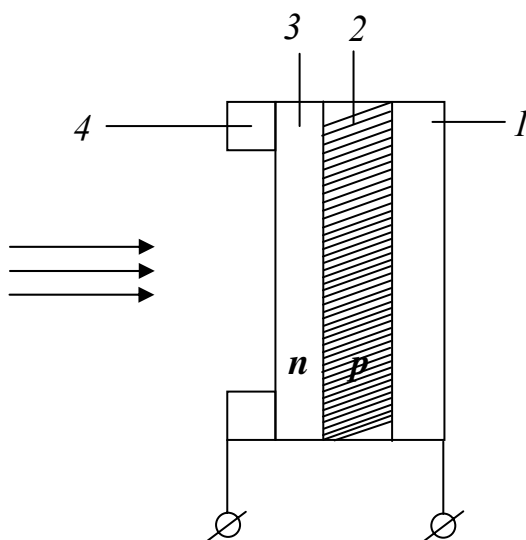


Рис. 4

Он состоит из железной пластинки круглой формы 1, покрытой слоем селена 2, на который нанесен тонкий полупрозрачный слой золота 3. От железной пластинки и пленки золота (на нее

положено контактное кольцо 4) сделаны отводы к зажимам, с помощью которых фотоэлемент включают в электрическую цепь. В результате специальной обработки часть атомов золота проникает в селен, обладающий дырочной проводимостью, и образует в нем слой с электронной проводимостью.

На границе двух слоев с различным видом проводимости создается электронно-дырочный переход. При освещении фотоэлемента в селене образуются свободные носители заряда, которые под действием электрического поля электронно-дырочного перехода разделяются: электроны накапливаются в полупроводнике *n*-типа, а дырки — *p*-типа. В результате на зажимах возникает фотоэлектродвижущая сила (фотоЭДС).

Если фотоэлемент подключить к гальванометру, то можно зафиксировать значение силы тока или фотоЭДС. Сила фототока и значение ЭДС зависят от освещенности фотоэлемента.

Вентильные фотоэлементы — это источники тока, преобразующие световую энергию в электрическую. Из существующих сейчас таких источников наибольшим КПД обладают Si-CaAs-фотоэлементы. Соединяя их последовательно, получают солнечные батареи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика выполнения работы

Прибор представляет собой горизонтально расположенную металлическую трубу, закрытую с торцов и укрепленную на подставках. С левой стороны внутри трубы находится селеновый фотоэлемент. При помощи рукоятки фотоэлемент можно поворачивать вокруг горизонтальной оси на 90° . Угол поворота определяется по шкале угломера, укрепленного на поверхности корпуса прибора.

Труба прибора внутри имеет несколько защитных ребер и черную матовую окраску. Ребра предохраняют фотоэлемент от отраженного излучения, а черная окраска — от световых бликов.

Перемещая лампочку вдоль оси прибора, можно менять освещенность фотоэлемента и определить его характеристики:

- зависимость силы фототока и фотоЭДС от освещенности;
- сопротивление элемента;

– интегральную чувствительность, т. е. чувствительность фотоэлемента к белому свету. Чувствительность численно равна силе фототока, i , возникающего в цепи фотоэлемента, когда световой поток, Φ , падающий на него, равен одному люмену:

$$\gamma = \frac{i}{\Phi} = \frac{i}{SE}. \quad (1)$$

Освещенность фотоэлемента, E , определяется по формуле:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{l^2}, \quad (2)$$

где I — сила света лампы накаливания, l — расстояние между лампой и фотоэлементом.

Порядок выполнения работы

1. Исследуемый фотоэлемент I установлен на конце оптической скамьи, вдоль которой может перемещаться источник света — электролампочка 2. Данная оптическая скамья вместе с фотоэлементом и электролампочкой изолирована от посторонних источников света с помощью откидного металлического кожуха. Схема подключения фотоэлемента I к электроизмерительным приборам показана на рис. 5.

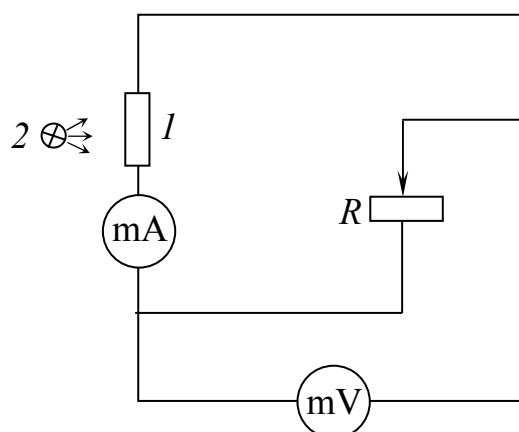


Рис. 5

2. Установите лампочку на расстоянии $l = 10$ см от фотоэлемента. Угол $\alpha = 0^\circ$.
3. Включите источник питания лампы накаливания и, увеличивая расстояние между лампой и фотоэлементом через каждые 2 см, измеряйте силу тока i и ЭДС ε .
4. Для каждого случая рассчитайте освещенность E фотоэлемента, пользуясь законом освещенности (2). Сила света лампы накаливания $I = 1$ кд.
5. По закону Ома определите $R(E)$ — сопротивление фотоэлемента.
6. Результаты измерений занесите в таблицу.

№ п/п	$l, \text{ м}$	$l^2, \text{ м}^2$	$E, \text{ лк}$	$i(E), \text{ мкА}$	$\varepsilon(E), \text{ В}$	$R(E), \text{ Ом}$
1						
2						
3						
·						
·						
·						

7. Постройте графики зависимости $i = f(E)$ и $\varepsilon = f(E)$.
8. По графику $i = f(E)$ найдите значение углового коэффициента $\frac{\Delta i}{\Delta E}$. Подставьте полученное значение в формулу (1) и вычислите интегральную чувствительность γ .

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

1. Таблицу с экспериментальными данными.
2. Графики зависимостей фототока и фотоЭДС от освещенности.
3. Значение интегральной чувствительности фотоэлемента.
4. Выводы о проделанной работе и полученных результатах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит явление фотоэлектрического эффекта? Как можно объяснить зависимость фототока от освещенности с точки зрения квантовой теории света?
2. Как объяснить с точки зрения зонной теории механизм собственной проводимости полупроводников?
3. Чем объясняется зависимость собственной проводимости полупроводников от температуры?
4. Какие полупроводники называются электронными (*n*-типа)? Каким путем могут быть созданы такие полупроводники?
5. Какие полупроводники называются дырочными (*p*-типа)? Как создаются такие полупроводники?
6. При каком соотношении между шириной запрещенной зоны и энергией кванта света может наблюдаться внутренний фотоэффект?
7. Как возникает *p-n*-переход и каковы его свойства?
8. Каков принцип действия вентильного фотоэлемента?
9. Что характеризует интегральная чувствительность фотоэлемента?
10. Дайте определения основных фотометрических понятий: сила света, световой поток, освещенность.
11. Как устроен селеновый фотоэлемент?
12. Почему во время выполнения работы нельзя изменять положение фотоэлемента и накал нити лампы?
13. Зачем внутри трубы прибора сделаны защитные ребра и почему он внутри окрашен черной матовой краской?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная учебная литература

1. Бутиков, Е. И. Физика [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов вузов : в 3-х книгах. Кн. 1. Механика / Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 352 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/75492/>.
2. Бутиков, Е. И. Физика [Электронный ресурс] : учебное пособие : в 3-х книгах. Кн. 2. Электродинамика. Оптика. / Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 336 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/75493/>.
3. Бутиков, Е. И. Физика [Электронный ресурс] : учебное пособие для студентов вузов : в 3-х книгах. Кн. 3. Строение и свойства вещества / Е. И. Бутиков, А. С. Кондратьев, В. М. Уздин ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 170 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/75494/>.

Дополнительная учебная и учебно-методическая литература

1. Асадуллин, Ф. Ф. Основы классической механики [Электронный ресурс] : учеб. пособие по дисциплине "Физика" для студ. всех направлений бакалавриата, спец., форм обучения : [электрон. версия бумажного изд.] / Ф. Ф. Асадуллин, Л. Н. Котов ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Сыкт. лесн. ин-т (фил.) ФГБОУ ВПО С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, Каф. физики. – Электрон. текстовые дан. (1 файл в формате pdf: 1,11 Мб). – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – on-line. – Систем. требования: Acrobat Reader (любая версия). – Загл. с титул. экрана. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com/ft/301-000215.pdf>.
2. Козлов, В. Ф. Курс общей физики в задачах [Электронный ресурс] / В. Ф. Козлов ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Москва : Физматлит, 2010. – 262 с. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/68398/>.
3. Дмитриева, Е. И. Физика для инженерных специальностей. Ответы на вопросы [Электронный ресурс] : [учебное пособие] / Е. И. Дмитриева ; Университетская библиотека онлайн (ЭБС). – Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2011. – 142 с. – (Скорая помощь студенту). – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/book/78809/>.
4. Калашников, Н. П. Физика. Интернет-тестирование базовых знаний [Текст] : учеб. пособие для подготовки студ. вузов к Федеральному интернет-тестированию по физике / Н. П. Калашников, Н. М. Кожевников. – Изд. 2-е, стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 160 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
5. Трофимова, Т. И. Физика. 500 основных законов и формул [Текст] Физика. 500 основных законов и формул [Текст] / Т. И. Трофимова. – 3-е изд., стер. – Москва : Высш. шк., 2001. – 64 с.
6. Трофимова, Т. И. Физика. Справочник с примерами решения задач [Текст] / Т. И. Трофимова. – Москва : Высш. образование, 2008. – 448 с. – (Основы наук).