

ФОТОННО-ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УСТРОЙСТВА В ИНФОКОММУНИКАЦИЯХ

Контрольные работы

Контрольная работа № 1

Моделирование полупроводниковых источников излучения как элементов электрической схемы.

Задание

Построить вольтамперные характеристики р-п перехода в диапазоне рабочих температур

Теоретические сведения и пример выполнения задания

Математической моделью полупроводникового прибора называется система уравнений, описывающих физические процессы в приборе, представленная в форме, допускающей ее объединение в математическую модель электронного устройства. Один и тот же прибор описывается большим количеством моделей, отличающихся степенью учета его особенностей и соответственно разной степенью точности, универсальности и экономичности.

Точность модели прибора, т.е. степень соответствия объекта (прибора) и его модели, оценивается только с точки зрения точности функционирования электронного устройства и модели (степенью соответствия набора выходных параметров).

Экономичность модели полупроводникового прибора при ее использовании в модели электронного устройства характеризуется затратами машинного времени и времени на подготовку задачи к решению, затратами машинной памяти, затратами на измерение параметров модели. При прочих равных условиях перечисленные затраты будут тем больше, чем сложнее модель прибора и чем большим количеством параметров она описывается.

Степень универсальности модели определяется ее применимостью к анализу более или менее широкого класса схем. Низкая универсальность модели будет у модели прибора, которая может применяться в модели лишь одной конкретной схемы в одном режиме эксплуатации.

Противоречивость требований высокой точности и высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности модели, с другой стороны, очевидна: чем подробнее в модели прибора отражены его свойства, тем точнее и универсальнее модель, но тем большим числом параметров она описывается, тем больше требуется объем вычислений и используемой памяти ЭВМ.

Таким образом, современные модели полупроводниковых приборов лишь приближенно отражают свойства реальных приборов. Степень этого приближения зависит от уровня знаний и точности математического описания процессов в приборе, а так же от возможностей используемых ЭВМ, информационного обеспечения описания моделей.

Учитывая изложенные особенности, при моделировании используются функции и зависимости аппроксимирующие параметры реальных приборов. Значение параметров

определены из справочной документации к конкретным моделям источников и приемников. Кроме того, используются обобщенные и типовые значения параметров наиболее распространенных типов СИД, ЛД и фотодиодов.

Модель светоизлучающего диода

Электрические характеристики СИД

Как было отмечено выше, основу полупроводниковых светоизлучающих диодов составляет р-п переход. Поэтому электрические характеристики СИД описываются аналогично р-п переходу.

Вольт-амперная характеристика р-п перехода

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п перехода – связь между током через р-п переход и приложенным напряжением. Уравнение (13) описывает ВАХ идеализированного р-п перехода, причем положительным считается напряжение, когда плюс источника напряжения приложен к р-области [6].

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{U}{\varphi_T \cdot m}\right) - 1 \right), \quad (13)$$

где I_s - тепловой обратный ток

φ_T - температурный потенциал

m - коэффициент рекомбинации, зависящий от электрофизических свойств полупроводника. (для Ge $m=1$, для Si $m=2$, для GaAs $m=3$).

Температурный потенциал

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q}, \quad (14)$$

где

$q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ - элементарный заряд, Кл

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, Дж/К

На рис. 15 приведены идеализированные вольтамперные характеристики для наиболее распространенных материалов.

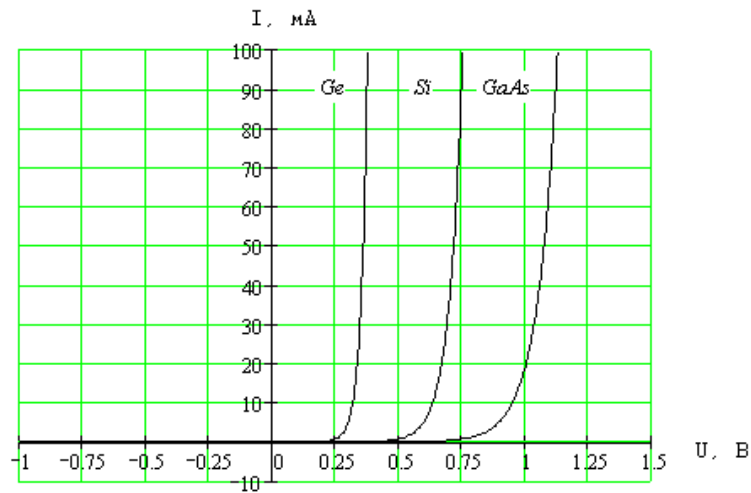


Рис. 15. ВАХ идеализированного p-n перехода

Ток I_S называют тепловым обратным током в соответствии с механизмом его образования и сильной зависимостью от температуры. Тепловой ток обусловлен тепловой генерацией неосновных носителей в нейтральных n- и p-областях перехода. Температурная зависимость теплового тока вызвана главным образом изменением концентрации неосновных носителей. Функцию $I_S(T)$ характеризуют температурой удвоения T_y , т.е. приращением температуры, вызывающим удвоение тока [6]:

$$T_y = (kT_0^2 \ln 2) / \Delta E_g, \quad (15)$$

где T_0 - средняя температура для рабочего диапазона, К

ΔE_g - ширина запрещенной зоны, Эв

Для заданной температуры T тепловой ток определяется из выражения:

$$I_S(T) = I_S(T_0) \cdot 2^{\Delta T / T_y}, \quad (16)$$

где $\Delta T = T - T_0$ - изменение температуры.

Для кремния температура удвоения вблизи $T = 25$ °С составляет $T_y \approx 4,5 \dots (6,5)$ °С [6], [7]. Если, например, температура повышается от -15 до +65 °С, тепловой ток увеличивается в 2^{16} раза. Для германия при $T = 25$ °С $T_y \approx 8$ °С, при прежнем повышении температуры тепловой ток возрастает в 2^{10} раза. На рис. 16. представлены зависимости относительного изменения теплового тока от температуры.

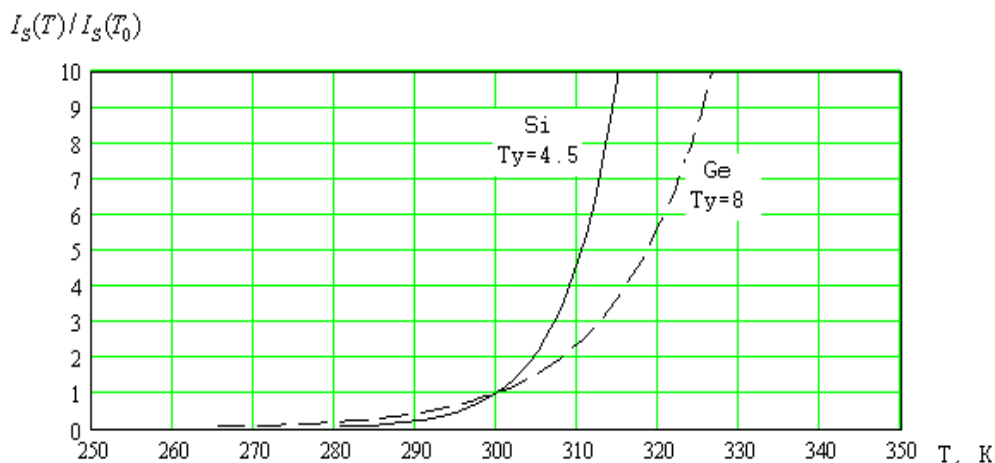


Рис. 17. Изменение теплового тока от температуры.

Тепловой ток резко снижается с ростом ширины запрещенной зоны, для кремния он меньше чем для германия. Тепловой ток уменьшается с ростом концентрации примесей вследствие снижения концентрации неосновных носителей. Чем выше концентрация примесей в данной области, тем меньше относительный вклад в тепловой ток носителей, генерируемых в этой области.

На рис. 18. представлена зависимость ВАХ р-п перехода на основе Si для рабочих температур.

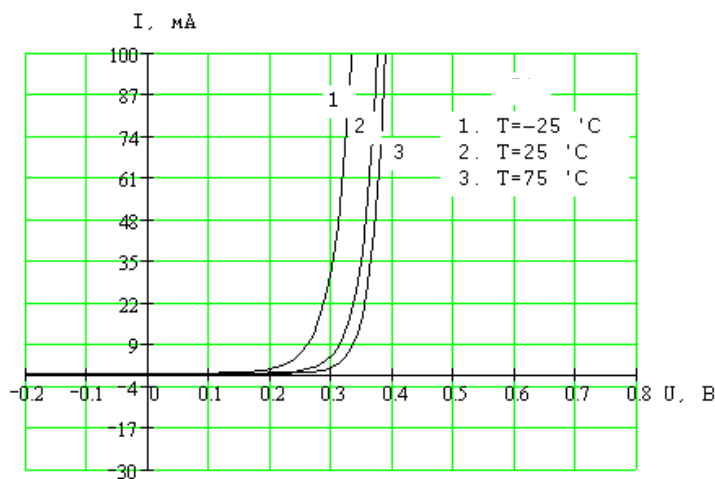


Рис. 18. Вольтамперная характеристики р-п перехода.

Из выражения (13) можно выразить напряжение U , приложенное к области пространственного заряда р-п перехода, в функции тока:

$$U = \varphi_T \cdot m \cdot \ln(I / I_s + 1) \quad (17)$$

Выражение (13) описывающее идеализированную ВАХ р-п перехода, учитывает далеко не все явления, происходящие в р-п переходе. В частности не учитывается омическое падение напряжения на высокоомной области проводника и на контактах. Прежде всего, необходимо учитывать падение напряжения на сопротивлении слаболегированной области базы, которое называют сопротивлением базы r_B . Падение напряжения на нем:

$$U_B = I r_B, \quad (18)$$

тогда полное напряжение на диоде

$$U_D = U + U_B = \varphi_T \cdot m \cdot \ln(I / I_s + 1) + I \cdot r_B \quad (19)$$

Сопротивление базы зависит от ее удельного сопротивления и определяется геометрией растекания тока рекомбинации. Полное падение напряжения на диоде из-за наличия сопротивления базы увеличивается прямое падение напряжения на диоде и возрастает рассеиваемая на нем мощность.

Из выражения (13) определяется дифференциальное сопротивление р-п перехода.

$$r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{\varphi_T}{I + I_s} \quad (20)$$

При прямом смещении $r_{\text{диф}}$ уменьшается с ростом тока. При обратном напряжении резко увеличивается. Дифференциальное сопротивление используется для описания работы р-п перехода на малом переменном сигнале.

Контрольная работа № 2

Моделирование емкостных характеристик полупроводниковых источников и приемников излучения.

Задание

Построить вольтфарадные характеристики полупроводниковых источников и приемников

Теоретические сведения и пример выполнения задания

Емкость p-n перехода

Емкость при обратном напряжении.

Изменение ширины запирающего слоя при приложении к p-n переходу внешнего напряжения U приводит к изменению объемного заряда ионизированных доноров в n-области и акцепторов в p-области, т. е. p-n переход обладает электрической емкостью. Емкость этого конденсатора называют *зарядной* или *барьерной емкостью p-n* перехода. Барьерная емкость равна отношению приращения заряда к вызвавшему это изменение приращению напряжения [7]

$$C_{\text{бар}} = \frac{dQ}{dU} \quad (21)$$

Ее влияние в электрических схемах проявляется в тех случаях, когда напряжение на p-n переходе изменяется во времени. Тогда помимо тока, определяемого статической ВАХ, протекает дополнительный емкостной ток, связанный с изменением объемных зарядов во времени:

$$I(t) = C(dU / dt) \quad (22)$$

В отличие от обычного конденсатора отношение заряда к полному напряжению на p-n переходе $Q_{\text{об}} / (\varphi_k - U)$ не равно его емкости. Это объясняется нелинейностью зависимости $Q_{\text{об}}$ от напряжения. Форма вольт-фарадной характеристики в общем случае зависит от распределения концентрации примесей в p-n переходе и выражается сложными функциями, поэтому применяют аппроксимацию [7]:

$$C_{\text{бар}} = \frac{C_{\text{бар}}(0)}{(1 - U / \varphi_k)^m}, \quad (23)$$

где $C_{бар}(0)$ - значение барьерной емкости при $U=0$,

φ_k - контактная разность потенциалов

m - коэффициент, зависящий от типа распределения концентрации примесей.

Типичные значения $m = 0,3 \dots 0,5$ (для плавного p-n перехода с линейным распределением концентрации примесей $m = 0,3$, для резкого $m = 0,5$).

Зависимость емкости от напряжения называется вольт-фарадной характеристикой.

Типичная характеристика для резкого и плавного перехода в безразмерных координатах показана на рис. 19.

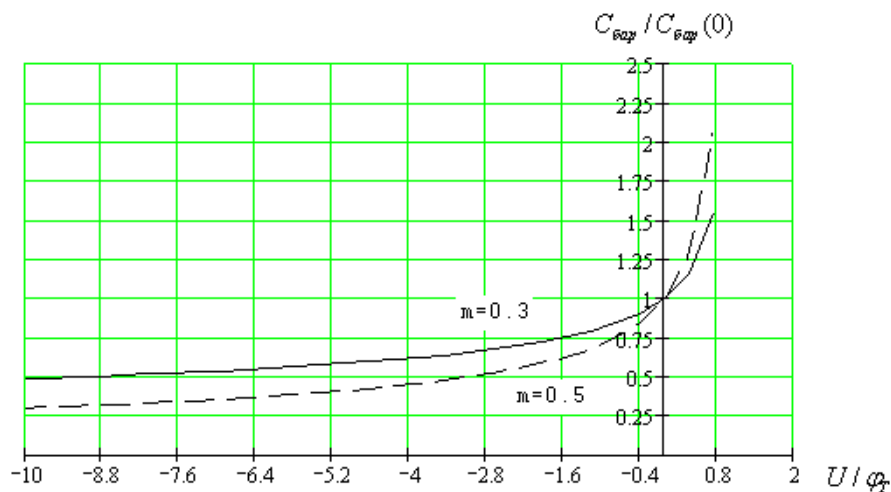


Рис. 19. Вольт-фарадная характеристика.

Таким образом с увеличением обратного напряжения барьерная емкость уменьшается пропорционально $(\varphi_k - U)^{-1/2}$ для резкого p-n перехода и $C_{бар} = (\varphi_k - U)^{-1/3}$ для плавного. При прямых напряжениях допущения не выполняются, сказывается сильное влияние диффузионной емкости p-n перехода.

Емкость при прямом напряжении

В этом случае существует две физические причины, обуславливающие емкость p-n перехода. Первая из них, та же, что и для обратного напряжения, это изменение зарядов в обедненном слое. Вторая заключается в том, что в зависимости от напряжения приложенного к p-n переходу, изменяется концентрация инжектированных носителей в нейтральных областях вблизи границ перехода и значение накопленного заряда, обусловленного этими носителями.

Для малого синусоидального сигнала на низких частотах $f \ll 2/(\pi \cdot \tau_{эф})$ диффузионная емкость:

$$C_{эф} = kI_S \tau_{эф} \exp(U_{\pm} / \varphi_T) / \varphi_T, \quad (24)$$

где $k=0,5 \dots 0,1$ - коэффициент, зависящий от толщины базы ($k=0,5$ для перехода с «толстой базой» $k=0,1$ для перехода с тонкой базой).

$\tau_{эф}$ - эффективное время жизни неосновных носителей в базе.

U_{\pm} - постоянная составляющая.

На высоких частотах $f \gg 2/(\pi \cdot \tau_{эф})$ диффузионная емкость уменьшается с ростом частоты до нуля, так как диффузии неосновных носителей через базу необходимо время $\tau_{эф}$, а в течение малого периода $T \ll \tau_{эф}$ заряд не успевает измениться.

Выражение (25) пригодно и для несинусоидальных сигналов большой амплитуды, напряжение которых меняется медленно со временем нарастания или спада много больше $\tau_{эф} / 4$, тогда вместо U_{\pm} надо подставлять $U(t)$, а емкость изменяется во времени. Для быстро меняющихся сигналов формула (25) непригодна, так как влияние диффузионной емкости при быстрых изменениях напряжения и токов пренебрежимо мало и им можно пренебречь.

При $U_{\pm} \gg \varphi_T$ справедлива приближенная запись [7]:

$$C_{эф} \approx kI \tau_{эф} / \varphi_T, \quad (25)$$

где $k = 0.5 \dots 1$ - коэффициент, зависящий от толщины базы ($k = 0.5$ для $W_B \gg L_p$ (толщина базы много больше диффузионной длины дырок в n-области) и $k = 1.0$ для $W_B \ll L_p$)

I – прямой ток, протекающий через диод

$\tau_{эф}$ - эффективное время диффузии (время жизни) неосновных носителей в базе.

Полная емкость представляется в виде суммы двух слагаемых:

$$C = C_{бар} + C_{эф}, \quad (26)$$

Контрольная работа № 3

Построение частотной характеристик прямой модуляции полупроводникового светоизлучающего диода

Задание

Построить частотную характеристику прямой модуляции полупроводникового светодиода

Теоретические сведения и пример выполнения задания

Быстродействие СИД определяется инерционностью процесса излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока. Инерционность СИД определяется процессом перезаряда барьерной емкости (емкости р-п перехода) и процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в активной области СИД. Быстродействие СИД характеризуется скоростью протекания переходных процессов и модуляционной характеристикой.

Промодулированная мощность оптического излучения описывается следующим выражением [10,11]:

$$L(\omega) = \frac{L(0)}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (31)$$

где τ - время жизни носителей.

Полоса модуляции определяется влиянием двух составляющих: излучательной и безызлучательной рекомбинациями. Составляющая излучательной рекомбинации пропорциональна сумме концентраций легирующих примесей p_0 и инжектированных носителей n . Так как в моделируемых СИД уровень легирования активной области большой и плотность рабочего тока велика, то время жизни можно определить как [10, 11]:

$$\tau_{изл} \approx \sqrt{\frac{qd}{JB}}, \quad \text{с} \quad (32)$$

где d – толщина активного слоя, см

J – плотность инжектируемого тока, А/см²

B – коэффициент излучательной рекомбинации, см³/с

Коэффициент излучательной рекомбинации изменяется в зависимости от материала. В таблице 1 приведены коэффициенты излучательной рекомбинации для наиболее часто используемых полупроводников [11, 12].

Таблица 1 – Коэффициенты излучательной рекомбинации.

Материал	$B, \text{см}\cdot\text{с}^{-1}$
GaAs	$2.7\cdot 10^{-10}$
GaSb	$2.4\cdot 10^{-10}$
InP	$1.3\cdot 10^{-9}$
InAs	$8.5\cdot 10^{-11}$
InSb	$4.6\cdot 10^{-11}$
InGaAsP	$3\cdot 10^{-10}$

Контрольная работа № 4
Построение частотной характеристик прямой модуляции
полупроводникового лазерного диода

Задание

Построить частотную характеристику прямой модуляции полупроводникового лазерного диода

Теоретические сведения и пример выполнения задания

Быстродействие лазерных диодов характеризуется аналогично СИД. Время нарастания и спада указывается в документации на конкретный тип ЛД. Особенностью работы ЛД является то, что при осуществлении импульсной модуляции путем инжекции импульса тока на форму выходного сигнала лазера накладываются затухающие колебания с частотой порядка нескольких ГГц. Это связано с возникновением фазового запаздывания при взаимодействии света и носителей. Релаксационные колебания, сильно ограничивающие область модуляции. Частотный отклик промодулированного света при слабом сигнале имеет вид [10, 11]:

$$\frac{S_m(\omega)}{S_m(0)} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{r0}}\right)^2 + j \left(\frac{\omega}{\omega_{r0}}\right) \left(\frac{1}{\omega_{r0}\tau_s} + \omega_{r0}\tau_p\right)}, \quad (43)$$

где ω_{r0} - резонансная частота

$$\omega_{r0} = \left\{ \frac{1}{\tau_n \tau_s} \cdot \frac{(I_b - I_{th})}{I_{th}} \right\}^{1/2}, \quad (44)$$

где τ_s и τ_p - соответственно время жизни носителей и фотонов,

I_b - ток смещения или прямой ток

I_{th} - пороговый ток

На рис. 31 приведены примеры расчета модуляционной характеристики. Над графиком указано отношение прямого тока к пороговому ($\tau_p = 1$ пс, $\tau_s = 3$ нс) [10].

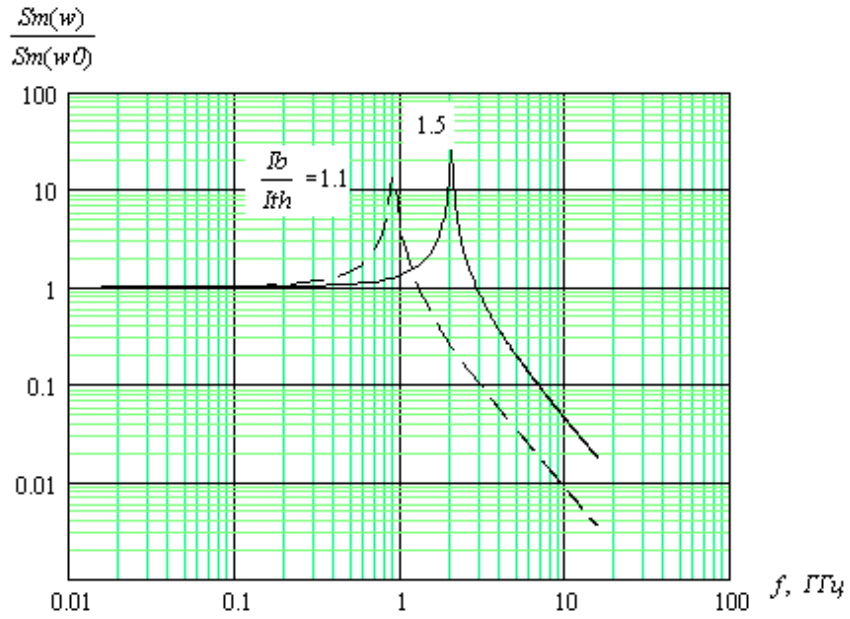


Рис. 31. Модуляционная чувствительность ЛД.

При возбуждении лазера скачком тока от 0 до I' наблюдается задержка начала генерации на время τ_3 , необходимое для возрастания плотности неравновесных носителей до порового уровня:

$$\tau_3 = \tau_{cn} \ln \frac{I}{I - I_{пор}}, \quad (45)$$

$\tau_{cn} \sim 10^{-9}$ с – спонтанное время жизни электронов

$\tau_\phi \sim 10^{-12}$ с – время жизни фотона в резонаторе

естественно τ_3 может быть уменьшено, если через лазер пропускать постоянный ток смещения.

ОБОЗНАЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН И ПАРАМЕТРОВ

φ_T - температурный потенциал

φ_K - контактная разность потенциалов

m - коэффициент, зависящий от электрофизических свойств полупроводника

τ_r - время нарастания импульса

τ_f - время спада импульса

$\tau_{эф}$ - эффективное время (диффузии) жизни носителей заряда

τ_ϕ - время жизни фотона

$\tau_{оет}$ - постоянная времени, характеризующая скорость процесса деградации источника

B - коэффициенты бимолекулярной рекомбинации

S - площадь p-n перехода

γ - токовая чувствительность

η - квантовая эффективность

ω - круговая частота

L_v - сила света

P_u - истинное значение мощности

P_θ - действительное (измеренное) значение мощности

T - абсолютная температура

T_0 - средняя температура для рабочего диапазона

T_V - температура удвоения

ΔE_g - ширина запрещенной зоны, Эв

Δf - эквивалентная полоса частот шума

M - коэффициент усиления лавинного фотодиода

$r_{оиф}$ - дифференциальное сопротивление

r_B - сопротивление базы диода

$C_{корт}$ - емкость, характеризующая емкость корпуса

J - плотность тока

I - ток

I_{ph} - фототок

I_{th} - пороговый ток

I_s - тепловой обратный ток

λ - длина волны

λ_0 - центральная длина волны

U - напряжение

R - сопротивление

$C_{бар}$ - барьерная емкость

$C_{дф}$ - диффузионная емкость

W_B - толщина базы р-п переход

$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка

$c = 2.997924 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с

$q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ - элементарный заряд, Кл

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ - постоянная Больцмана, Дж/К

Литература

1. ГОСТ 25699-85. Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1983
2. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. Москва: Сайрус-систем, 1999.
3. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. Москва: Эко-трендз, 1998
4. Гада Н. Ф. Измерения в оптоэлектронике, М. Энергоатомиздат, 1982
5. Гребнев А. К., Гридин А. К., Дмитриев В. П. Оптоэлектронные элементы и устройства. Москва: Радио и связь, 1998.
6. Тугов Н. М., Глебов Б.А. Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: учебник для ВУЗов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Электронные приборы. Под ред. Дулин В. Н. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Быстров Ю. А. и др. Электроника: справочная книга СПб Энергоатомиздат, 1996.
9. Шарупич Л. С., Тугов Н. М. Оптоэлектроника: Учебник для техникумов М. Энергоатомиздат, 1984.
10. Суэмацу Я. Основы оптоэлектроники. М. Мир, 1988.
11. Волоконно-оптическая связь: Приборы, схемы и системы: пер. с англ. / под ред. М. Дж. Хауэса, Д. В. Моргана. – М.: Радио и связь, 1982.
12. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. Москва: Техносфера, 2004
13. Анисимова И. Д., Викулин И. М., Заитов Ф. А., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. М. Радио и Связь, 1984
14. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения: учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
15. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника и микропроцессорная техника. М.: Высшая школа, 2004.
16. Лапчик М. П., Рагулина М. И., Хеннер Е. К. Численные методы. М.: Академия, 2004
17. Бутусов М. М., Галкин С. Л., Ороинский, С. П. Пал Б. П. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987.
18. ГОСТ 24714-81. Лазеры. Методы измерения параметров излучения. Общие положения. М.: Издательство стандартов, 1981
19. ГОСТ 25786-83. Лазеры. Методы измерения средней мощности, средней мощности импульса, относительной нестабильности средней мощности лазерного излучения. М.: Издательство стандартов, 1983
20. www.fot.ru ООО «Волоконно-оптическая техника» - Сплети свою сеть.
21. www.tls-group.ru Группа компаний Телеком-сервис ИТ.
22. ГОСТ 2.761-84. Обозначения условные графические в схемах. Компоненты световодных систем. М.: Издательство стандартов, 1984
23. Архангельский А. Я. Программирование в C++ Builder 6 . М.: ООО «Бином-Пресс», 2005.
24. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей: учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986.
25. Крылов В. В. , Корсаков С. Я. Основы теории цепей для системотехников. Москва, Высшая школа, 1990.
26. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника: свойства материалов. Справочник. Киев: «Наукова думка», 1975