

УДК.539.3

СИСТЕМА СРАВНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РЕАЛЬНЫХ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭФФЕКТ ЭРЛИ

Д.т.н. М.А. Мирошник¹, к.ф.-м.н. Р.И. Цехмистро², д.т.н. М.А. Омаров²

1. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков

2. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Рассматривается система сравнения моделей реальных биполярных транзисторов, использующих модель Эберса-Молла и эффект Эрли, с помощью автоматизированной системы расчета статических характеристик.

Розглядається система порівняння моделей реальних біполярних транзисторів, в яких використовують модель Еберса-Молла і ефект Ерлі, за допомогою автоматизованої системи розрахунку статичних характеристик

A system of comparing models of real bipolar transistors using the Ebers-Moll model and the effect of Earley using an automated system for calculating the static characteristics.

Ключевые слова: биполярный транзистор, модель, эффект.

Введение. Компьютеризированные системы исследования параметров биполярных транзисторов и устройств на их основе успешно используются как в автоматизации экспериментальных исследований, так и в учебном процессе. Однако, учитывая тематику соответствующих учебных дисциплин, данные системы зачастую ограничиваются созданием виртуального вольтметра и осциллографа. Это, безусловно, позволяет приобщать учащихся к программированию и способствует автоматизированной обработке результатов наряду с экономией материальных и человеческих ресурсов. Однако подобные системы часто не дают возможности пронаблюдать физическую сущность

процессов, происходящих в полупроводниковых приборах, из-за отсутствия реальных моделей.

Данная работа посвящена вопросу моделирования работы биполярного транзистора средней и малой мощности в статическом режиме, которая позволяет сравнивать входные и выходные характеристики, снятые экспериментально с теоретическими зависимостями, полученные на основе модели Эберса-Молла с учетом эффекта Эрли [1-3].

Постановка задачи. В учебной литературе имеется немного информации о математических и физических моделях работы биполярных транзисторов в реальных условиях. Например, в явном виде практически отсутствуют формулы, которые описывают поведение выходных характеристик реальных биполярных транзисторов, включающие в себя участок отсечки, активную область и область насыщения.

Хотя следует отметить, что с помощью компьютерных программ типа PSpice или Microcap, в которых реальный биполярный транзистор может быть представлен моделью Гумена-Пина, формулы для описания выходных зависимостей могут быть получены [1-5].

Целью данной работы является демонстрация возможностей учебной системы, которая позволяет сопоставлять модели реального транзистора и моделирование физической сущности процесса изменения сопротивления базы диода с р-п переходом. В приведенных ниже результатах экспериментальные данные, соответствующие выходным характеристикам для схемы с общим эмиттером, получены и переданы в ПК в соответствии со схемой, представленной на рис.1.

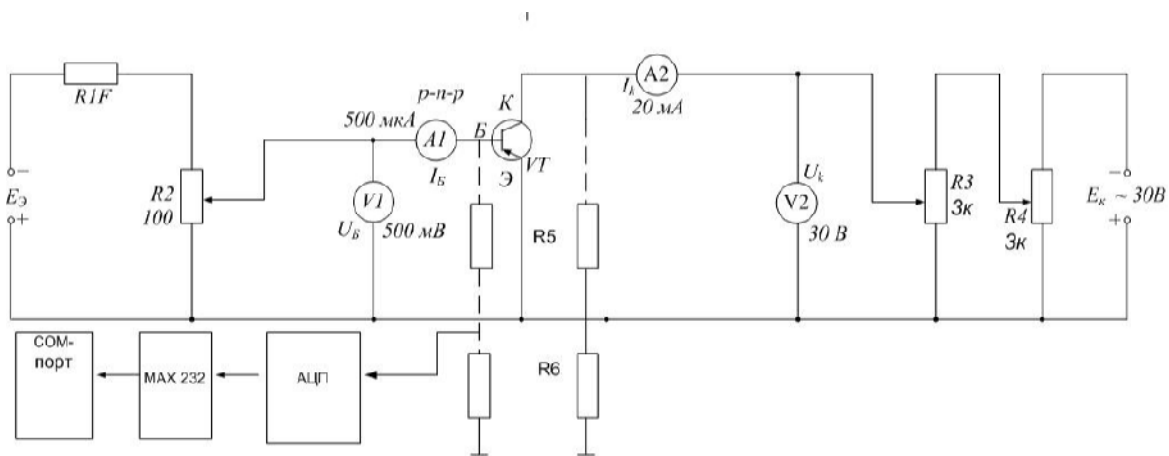


Рис.1. Схема лабораторного макета

Описание лабораторного макета

На рис.1. приведена схема лабораторного макета, связанного с ПК через com - порт. Данные из этой схемы автоматически переносятся в ПК и сохраняются в текстовом файле.

Лабораторный стенд включает в себя традиционную схему снятия входных и выходных характеристик биполярного транзистора по схеме с общим эмитером, которая дополнена делителем R5-R6. Напряжение с делителя подается на схему АЦП, выполненную на микросхеме AD7896 с источником опорного напряжения +5V на микросхеме REF195. Согласование уровней сигналов обеспечивается использованием микросхемы MAX-232, связанной с последовательным портом компьютера. Питание микросхемы AD7896 осуществляется источником опорного напряжения, а для микросхемы MAX-232 использовался отдельный стабилизатор питания на микросхеме 78L05 с выходом на 5В и входом на 9-12В. Эта микросхема имеет в своем составе преобразователь напряжения, преобразующий однополярное напряжение питания +5В в двуполярное ±10В. Входной каскад АЦП включает в себя делитель напряжения на двух одинаковых резисторах, отличных от R5-R6, которые также обеспечивают токовую защиту входов.

Конструкция стенда представлена на рисунке 2, где также показана реализации нижней части схемы (рис. 1), которая обеспечивает взаимодействие с компьютером.

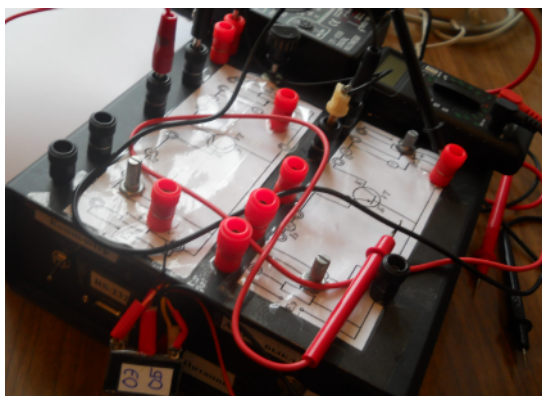


Рис.2. Конструкция стенда

На рисунке 3 представлен модуль взаимодействия схем снятия входных и выходных характеристик с компьютером.

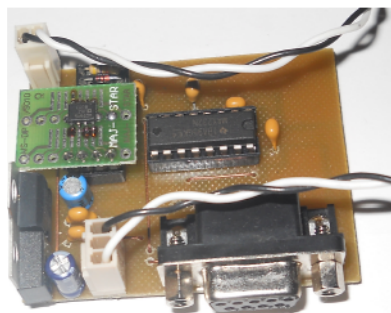


Рис.3. Модуль взаимодействия

Программная часть макета. Программное обеспечение автоматизированного стенда разработано в среде C++ Builder и состоит из модуля, обеспечивающего прием-передачу данных от АЦП аппаратного модуля через com – порт и сохраняющие их в текстовом файле для последующего отображения информации на графике (рис.4).

На рисунке 5 представлена главная форма автоматизированной системы, на котором представлена панель для отображения экспериментально снятых зависимостей, позволяющая изменять количество вводимых значений аргумента и сопоставлять их с расчетными данными по соотношению [6-8] :

$$I = I_o \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Для данного соотношения предусмотрено задание максимального и минимального значения напряжения U (аргумента) и значения I_o .

Программа взаимодействия с последовательным портом включает в себя сегмент инициализации порта, включающий в себя пользовательское включение линии готовности порта к соединению.

Используются опции выбора скорости передачи данных и включение линии запроса обмена данных. Кнопка открыть порт позволят принимать или передавать данные.

Сегмент передачи данных через последовательный порт включает в себя окно для ввода данных для передачи и окно для отображения принятых данных и последующего сохранения их в текстовом файле для дальнейшего отображения в графическом виде.

В него также входит модуль обеспечивающий графическое отображение входных и выходных характеристик по схеме с общим эмитером с консольным вводом данных от амперметра и вольтметра, что дает возможность выделить области насыщения, активную область, область отсечки. Предусмотрена возможность задания количества вводимых значений показаний значения тока и напряжения (до 100).

Указанный модуль предусматривает также возможность расчета входной характеристики по соотношению [9-12]

$$I = I_o \left(1 + \frac{U_{\kappa\epsilon}}{U_{\epsilon p}} \right) \left(e^{\frac{qU_{\epsilon p}}{kT}} - 1 \right), \quad (2)$$

где I_o – обратный ток p-n перехода, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $T=300$ К, $U_{\epsilon p}$ -напряжение Эрли.

Это напряжение, которое вводится для описания явления “модуляции ширины базы”, приводящее к изменению ее сопротивления, имеет вид [9-10,13]:

$$U_{\epsilon p} = \frac{q(Wb)^2 Nd}{2\epsilon}, \quad (3)$$

где q – заряд электрона, wb – толщина базы транзистора, Nd – концентрация донорных примесей, ε – диэлектрическая проницаемость.

Значение напряжения Эрли в зависимости от типа транзистора обычно составляет десятки вольт.

В программе предусмотрен ввод значений тока насыщения, напряжений $U_{бэ}$, $U_{кэ}$. Имеется возможность отобразить на одних и тех же графиках экспериментальную зависимость $I_b = f(U_{бэ})$, $U_{кэ} = \text{const}$ и аналогичные зависимости, полученные теоретически. Указанная зависимость позволяет определить статические параметры h_{11e} – входное сопротивление ($h_{11e} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_e$) как по теоретическим, так и по экспериментальным зависимостям и сопоставляя их.

Выходная характеристика биполярного транзистора, в соответствии со схемой общий эмиттер, описывается зависимостью $I_k = f(U_k)$, $I_b = \text{const}$:

$$I_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{\delta} + \frac{I_{ко}}{1-\alpha} + \frac{U_k}{(1-\alpha)r_k}, \quad (4)$$

где α – коэффициент передачи, $I_{ко}$ – обратный ток коллектора, U_k – напряжение на коллекторе, r_k – сопротивление коллекторного перехода.

Результаты анализа. Запрограммированные аналитические соотношения позволяют сопоставить математические модели реальных транзисторов с экспериментальными результатами, в которых учитывается сопротивление базы. Если учесть сопротивление базы, то соотношение (1) переписывается в виде [9-10]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q(U - R_b I)}{kT}} - 1 \right). \quad (5)$$

Из него следует, что в явном виде зависимость тока от напряжения определить невозможно. С увеличением сопротивления базы наклон вольт-амперной характеристики уменьшается, что как известно, обусловлено тем, что часть общего приложенного напряжения распределяется на сопротивление базы.

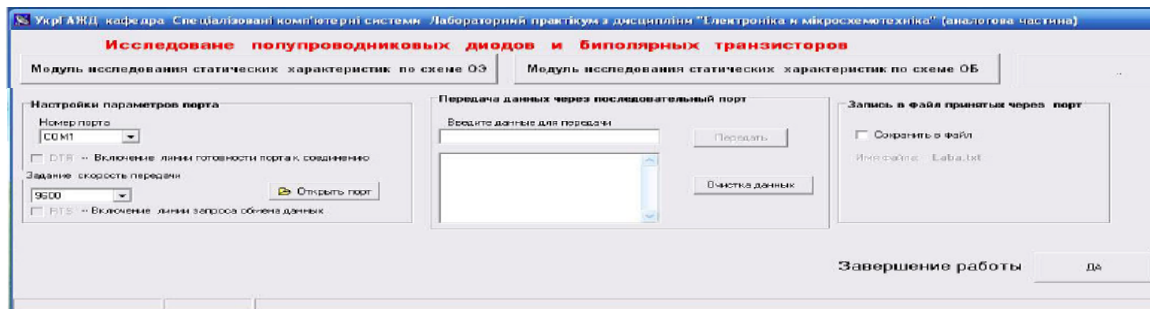


Рис. 4. Текстовый файл

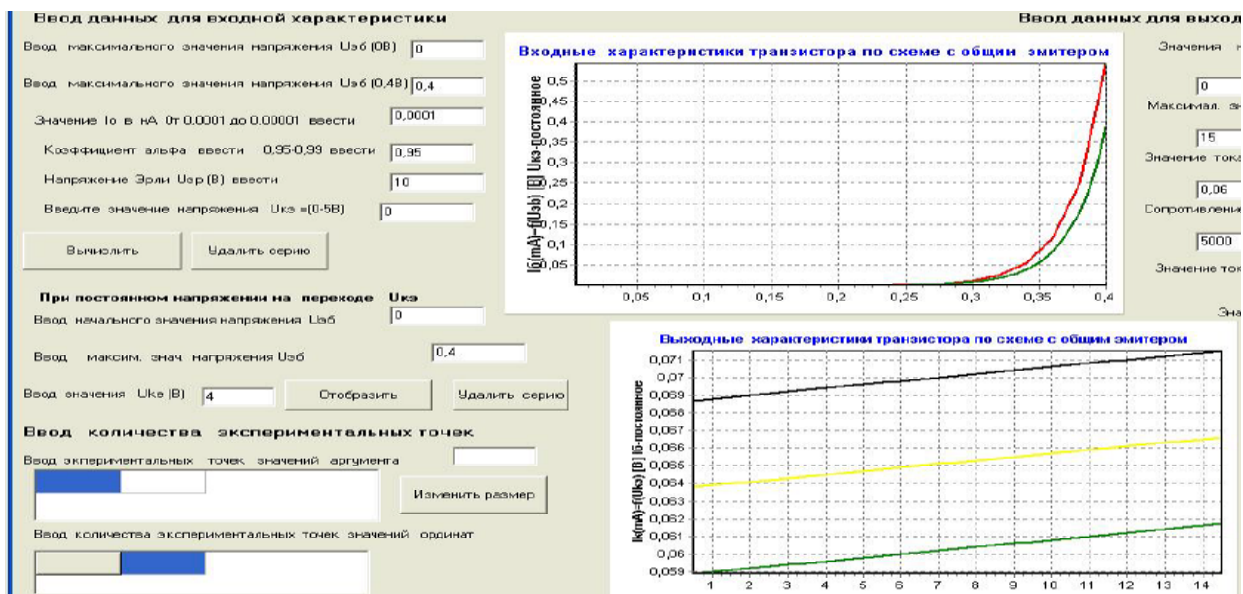


Рис.5. Главная форма автоматизированной системы

Сопротивление базы транзистора (диода) зависит от напряжения на соседнем переходе, что в свою очередь приводит к изменению ширины базы, которое вызвано изменением распределения неосновных носителей в базе. Изменение распределения концентрации неосновных носителей в области базы изменяет ток, протекающий через диод.

Для нахождения зависимости тока через переход коллектор-база (эмитер-база) от напряжения, приложенного к переходу, введем в рассмотрение распределение $\Delta p(x)$ в области базы (р-п-р транзистор). Общее приложенное напряжение распределяется на напряжение на р-п переходе и напряжение на базе.

Для детальной оценки влияния сопротивления базы на входные характеристики транзистора перепишем соотношение в виде (5):

$$V(I) = IR_b - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \quad (6)$$

Сопротивление базы диода будет зависеть от распределения концентрации неосновных носителей в области базы и, следовательно, от тока через диод. Определим распределение неосновных носителей в области базы $\Delta p(x)$ и сопротивление базы R_b . Введем в рассмотрение падение напряжения на р-п переходе и на базе [12-14]:

$$V(I) = V_{pn} + V_{Rb} \quad (7)$$

Напряжение на базе выражается через распределение поля $E(x)$ вдоль базы:

$$V_{Rb} = \int_0^l E(x) dx \quad (8)$$

где l – длина базы.

Напряженность поля определяется через уравнение, выражающее плотность тока, протекающего через область базы (п-типа), которое включает в себя диффузионную и дрейфовую составляющие, как для тока электронов, так и дырок:

$$E(x) = \frac{I - qD_p(\mu_n/\mu_p - 1) dP(x)/dx}{q\mu_n n_0 \left(1 + \frac{\left(1 + \mu_p/\mu_n \right)}{n_0 P(x)} \right)}, \quad (9)$$

где I – ток через диод; D – коэффициент диффузии дырок; μ_n – подвижность электронов, μ_p – подвижность дырок, n_0 – равновесная концентрация электронов, $dP(x)$ – распределение неосновных носителей в результате инжекции р-п переходом $b\mu/\mu_p$. Распределение концентрации носителей в области базы задается соотношением:

$$\Delta P(x) = P_n e^{\frac{qV}{kT}} \left(\frac{\text{sh} \left(\frac{l-x}{L_p} \right)}{\text{sh} \left(\frac{l}{L_p} \right)} \right). \quad (10)$$

Подставляя $\Delta p(x)$ в $E(x)$ и интегрируя от 0 до L , получим вольт-амперную характеристику перехода база-эмиттер:

$$V_b = \int_0^l E(x) dx = \int_0^l \frac{I - qD_p(\mu_n/\mu_p - 1) (dP(x)/dx)}{q\mu_n n_0 \left(1 + \frac{\left(1 + \mu_p/\mu_n \right)}{n_0} P(x) \right)} dx \quad (11)$$

Соотношение 11 можно разбить на два слагаемых, т.е. на слагаемое со значением тока в числителе в подынтегральном выражении и слагаемое с остальными членами из числителя.

После преобразований получим:

$$V(I) = \frac{IL_p(1+a)^{-1/2}}{q\mu_n n_0 \left(1 + \frac{\left(1 + b^{-1} \right)}{n_0} P_0 \right)} \ln \left(\frac{\left(\text{th} \left(l/2L_p \right) - a + \sqrt{1+a^2} \right) \left(a + \sqrt{1+a^2} \right)}{\left(\text{th} \left(l/2L_p \right) - a - \sqrt{1+a^2} \right) \left(\sqrt{1+a^2} - a \right)} \right) + \frac{kT(b-1)}{q(b+1)} \ln \left(\frac{1 + \left(1 + b^{-1} \right) / n_0 (P_n + \Delta P)}{1 + \frac{\left(1 + b^{-1} \right) P_0}{n_0}} \right) \quad (12)$$

$$a = \frac{\left(\left(1 + b^{-1} \right) / n_0 \right) P_n \frac{J}{J_0}}{1 + \left(\left(1 + b^{-1} \right) / n_0 \right) P_n \text{sh} \left(\frac{l}{L_p} \right)} \quad (13)$$

Второе слагаемое представляет из себя потенциал Дембера:

$$U_2 = \int_0^l \frac{D_p(b-1)}{\mu_n n_0 (1 + (1+b^{-1})P(x)/n_0)} - \frac{dP(x)}{d(x)} dx \quad (14)$$

Подставляя соотношение (10) в (13) получим:

$$U_2 = \frac{kT}{q(b+1)} \ln \left(\frac{1 + (1+b^{-1})(P_n + \Delta p(x)/n_0)}{1 + (1+b^{-1})P_n/n_0} \right) \quad (15)$$

Из него следует, что при $\Delta p=0$ $U_2 = 0$.

Следовательно, можно предположить, что решающий вклад в падение напряжения на базе вносит потенциал Дембера. Это следует из того, что в нем учитывается градиент концентраций распределения носителей заряда.

Анализ выходных и входных статических характеристик наглядно демонстрирует, что имеет место заметный рост тока i_K с ростом $u_{KЭ}$, связанный с эффектом Эрли. Этот рост выражен значительно сильнее, чем в схеме ОБ в связи с более резкой зависимостью от напряжения на коллекторном переходе коэффициента передачи тока базы по сравнению с коэффициентом передачи тока эмиттера. Также более резкой зависимостью от тока эмиттера и, соответственно, от тока базы объясняется практическое отсутствие эквидистантности выходных характеристик.

Особенностью выходной характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером по сравнению с характеристикой в схеме с общей базой, является то, что она целиком лежит в первом квадранте. Это связано с тем, что в схеме ОЭ напряжение $u_{KЭ}$ распределяется между обоими переходами, и при $u_{KЭ} < u_{БЭ}$ напряжение на коллекторном переходе меняет знак и становится прямым, в результате транзистор переходит в режим насыщения при $u_{KЭ} > 0$.

Однако реально такая зависимость существует, так как при увеличении обратных напряжений ширина р-п переходов увеличивается, а ширина базы уменьшается. Зависимость ширины базы от величины обратного напряжения на коллекторе называется эффектом модуляции ширины базы или эффектом Эрли.

Объемное сопротивление базы для разных транзисторов составляет десятки или сотни ом.

Объемное сопротивление базы влияет на свойства транзисторов. Большое значение r_B' приводит к возрастанию активных потерь в транзисторе, ухудшению его частотных свойств и к уменьшению температурной стабильности. В тоже время малое сопротивление r_B' вызывает снижение напряжения пробоя и увеличение барьерной емкости коллекторного перехода.

Дифференциальное сопротивление базы r_B'' определяет величину обратной связи в транзисторе.

Выводы. Таким образом, влияние сопротивления базы, приводящее к дополнительному падению напряжения, приводит к уменьшению тока, протекающего через р-п переход, и может быть выражено через градиент концентраций неравновесных носителей тока. Полученное соотношение (15) описывает вид вольт-амперной характеристики также эффективно, как и соотношение Эрли (2), что показал численный анализ.

Сравнивая экспериментально снятые входные характеристики со справочными данными для транзистора BC556A (р-п-р) и с теоретической зависимостью по соотношению (2), установлено приемлемое для инженерной точности совпадение результатов. Погрешность не более 10%, если принять за эталонные справочные данные. Сравнение результатов расчетов по соотношениям (2), учитывающее свойство базы р-п перехода (эффект Эрли), с результатами по соотношению (15), показало совпадение в пределах 5%. Проведенный анализ подтвердил, что полученные соотношения (13),(14), описывающие физические процессы в базе р-п перехода, т.е. изменения распределения концентрации носителей приемлемы, также как и моделирование модуляции ширины базы (введением в рассмотрение напряжения Эрли).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Massobrio G., Antognetti P. *Semiconductor Device Modeling with SPICE. Second Edition.* McGraw-Hill, Inc. 1988. – 479 p.
2. Архангельский А.Я. *PSPice и Design Center. В 2-х ч. Часть 1. Схемотехническое моделирование. Модели элементов. Макромоделирование. Учебное пособие.* - М.: МИФИ, 1996. - 236 с.
3. Маллер Р., Кейминс Т. *Элементы интегральных схем: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1989. – 630 с., ил.
4. Носов Ю.Р. и др. *Математические модели элементов интегральной электроники.* - М.: Сов. Радио. 1976. – 304 с.
5. Разевиг В.Д. *Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0.* – М.: Солон 1999. – 698 с.
6. *Физика твердого тела: Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Барьяхтар, зам. глав. ред. В. Л. Винецкий. Т. 1, 2. Киев: Наукова думка, 1998.*
7. Sah C.-T. *Fundamentals of solid-state electronics / C.-T. Sah. World Scientific, 1991. 1011 p.*
8. Киреев А.С. *Физика полупроводников / А.С. Киреев. М.: Высшая школа, 1969. 590 с.*
9. Бонч-Бруевич В.Л. *Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашиников. М.: Наука, 1977. 672 с.*
10. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов / М.: Мир, 1984. Т.1, 456 с; Т.2, 456 с.*
11. Шалимова К.В. *Физика полупроводников / К.В. Шалимова. М.: Энергия, 1976. 416 с.*
12. Орешкин П.Г. *Физика полупроводников и диэлектриков / П.Г. Орешкин. М.: Высшая школа, 1972. 448 с.*
13. Гуртов В.А. *Сборник задач по физике поверхности полупроводников / В.А. Гуртов. Петрозаводск, 1985. 92 с.*
14. Ю П. *Основы физики полупроводников / П. Ю, М. Кардона. Пер. с англ. И.И. Решиной. Под ред. Б.П. Захарчени. 3-е изд. М.: Физматлит, 2002. 560 с*