

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова
С.А. Артищев

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК – ПОЛУПРОВОДНИК**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине
«Физические основы микро- и наноэлектроники»

Томск
2022

УДК 538.971
ББК 22.35
С 470

Рецензент

Еханин С.Г., доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

Славникова Марина Михайловна, Артищев Сергей Александрович

Исследование структуры металл – диэлектрик – полупроводник: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Физические основы микро- и наноэлектроники» / М.М. Славникова, С.А. Артищев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 11с.

В методических указаниях кратко объяснены явления, происходящие в структуре металл – диэлектрик – полупроводник при приложении на металлический электрод напряжения разной полярности и величины. С помощью энергетических диаграмм объяснены понятия «обогащение, обеднение, инверсия». Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, изучающих курс «Физические основы микро- и наноэлектроники».

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.971
ББК 22.35

© Славникова М.М., 2022
© Артищев С.А., 2022
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение.....	4
2	Вольтфарадная характеристика МДП – структур.....	6
3	Методика эксперимента.....	8
4	Порядок выполнения работы.....	9
5	Контрольные вопросы.....	10
	Список рекомендуемой литературы.....	10

1 ВВЕДЕНИЕ

Структура металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) является основой для изготовления приборов с переносом заряда, полевых транзисторов с изолированным затвором, элементов памяти, твердотельных матричных видеоконвертеров и др. Во всех этих приборах используется изменение заряда в приповерхностной области полупроводника под действием внешнего поля или других факторов.

Рассмотрим область пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника n-типа проводимости в зависимости от напряжения на металлическом электроде МДП-структуры (рисунок 1.1.). ОПЗ может находиться в трех режимах.

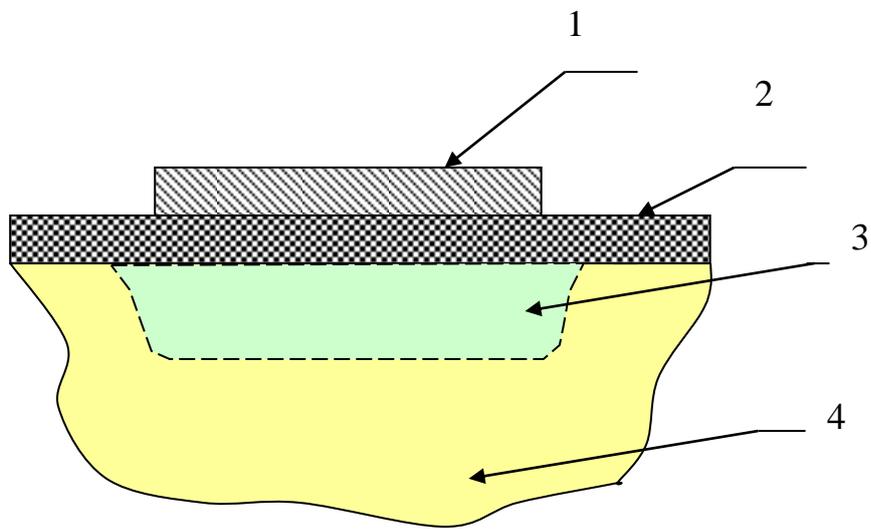


Рисунок 1.1 – Структура металл-диэлектрик-полупроводник (1 - металлический электрод; 2 - диэлектрик; 3 - ОПЗ полупроводника; 4 - полупроводник)

При положительном напряжении на металлическом электроде свободные электроны из объема полупроводника притягиваются в ОПЗ, т.е. происходит обогащение поверхности полупроводника основными носителями заряда.

При небольшом отрицательном смещении электроны выталкиваются из ОПЗ в объем, происходит обеднение поверхности основными носителями заряда. Отрицательный заряд металлического электрода компенсируется при этом положительным зарядом ионизованных доноров и свободных дырок в ОПЗ.

С ростом отрицательного напряжения ширина ОПЗ увеличивается, вместе с этим увеличивается концентрация свободных дырок вблизи поверхности. По достижении некоторого напряжения концентрация дырок непосредственно у поверхности превысит концентрацию электронов, т.е. на поверхности произойдет инверсия (изменение) типа

проводимости. Дальнейший рост отрицательного напряжения не приводит к увеличению ширины ОПЗ. Увеличивается только концентрация дырок в инверсионном слое.

Ме – Д – п/п n - типа

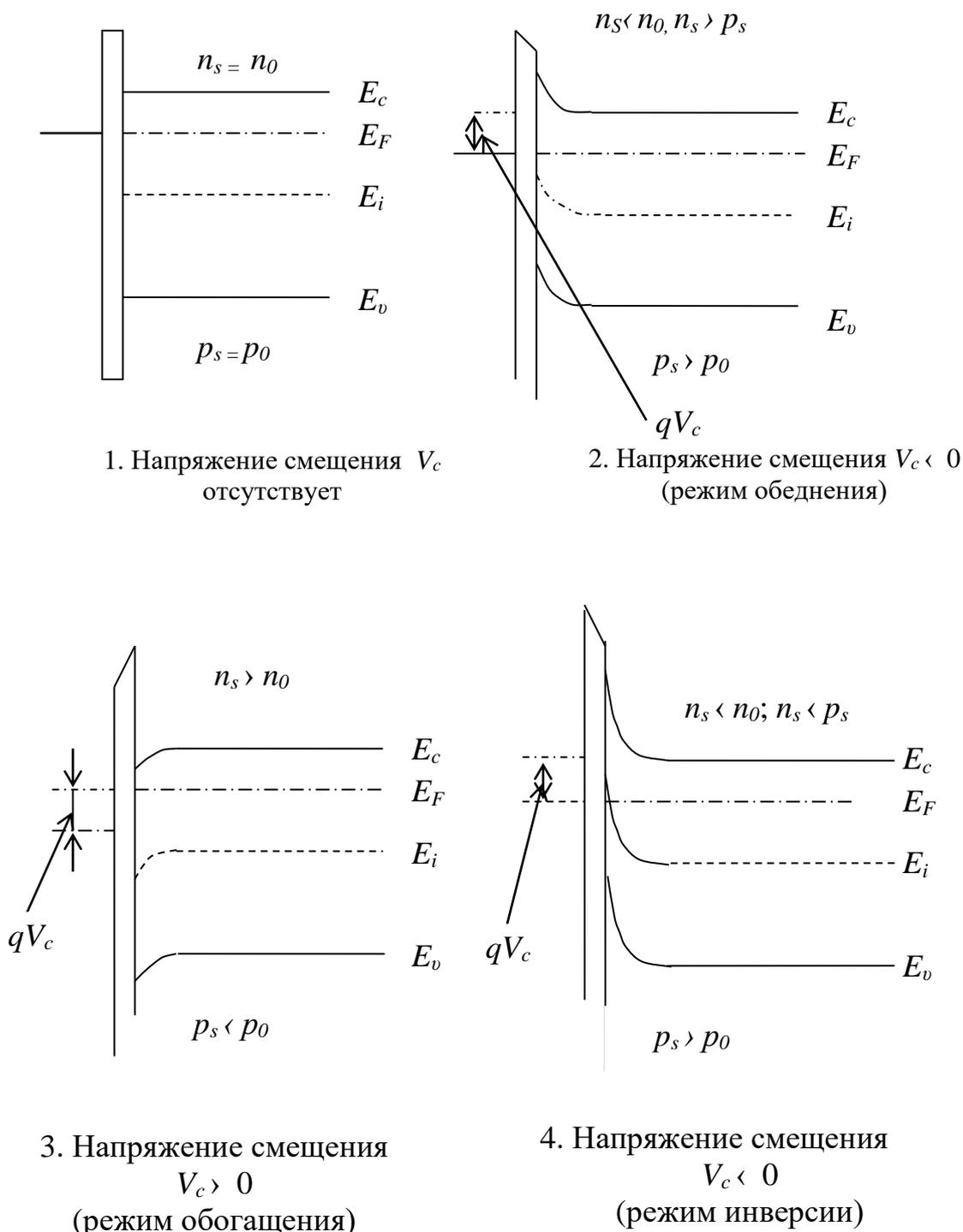


Рисунок 1.2 – Энергетические зонные диаграммы идеальной МДП – структуры

Рассмотренные состояния поверхности полупроводника *n*-типа иллюстрируют энергетические зонные диаграммы на рисунке 1. 2.

В МДП – структуре на полупроводнике *p*-типа обогащение, обеднение и инверсия наблюдаются при другой полярности напряжения смещения.

В диэлектрике реальных МДП – структур обычно присутствует встроенный заряд (например, обусловленный ионами натрия). Кроме того, заряд несут энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника и диэлектрика вблизи границы раздела диэлектрик - полупроводник. Эти уровни (их называют поверхностными состояниями) могут возникать за счет загрязнения поверхности чужеродными атомами, а также из-за нарушения структуры диэлектрика и поверхности полупроводника. Заряд в диэлектрике и на поверхностных состояниях приводит к изгибу энергетических зон у поверхности полупроводника в отсутствие напряжения смещения.

Целью настоящей работы является изучение режимов обогащения, обеднения и инверсии в МДП – структуре и определение заряда в диэлектрике. Экспериментальная методика основана на измерении вольтфарадной характеристики МДП – структуры и сравнении ее с расчетной.

2 ВОЛЬТФАРАДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МДП–СТРУКТУРЫ

Малосигнальную емкость МДП – структуры *C* можно представить в виде двух последовательно включенных емкостей – емкости диэлектрика *C_д* и емкости ОПЗ *C_п*.

Результирующая емкость *C* определяется по правилу сложения обратных величин

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_p}. \quad (2.1)$$

Зависимость емкости МДП – структуры от напряжения смещения (см. рисунок 2.1) определяется изменением емкости ОПЗ, т.к. емкость диэлектрика от напряжения не зависит:

$$C_d = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.2)$$

где $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ ф/м;

d, ε – соответственно толщина и относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь металлического электрода.

В режимах обогащения и сильной инверсии ОПЗ подобна проводнику ($C_p \gg C_d$), и емкость МДП – структуры равна емкости диэлектрика. В режиме обеднения емкость ОПЗ

можно рассматривать как емкость конденсатора, диэлектриком которого служит слой ОПЗ, обедненный свободными носителями заряда. С ростом обедняющего напряжения эта емкость уменьшается из-за расширения ОПЗ, что приводит к уменьшению емкости МДП – структуры до минимального значения C_{min} .

В режиме инверсии скорость накопления неосновных носителей заряда у поверхности полупроводника определяется, в основном скоростью тепловой генерации. На высоких частотах, когда скорость изменения измерительного сигнала больше, чем скорость тепловой генерации неосновных носителей заряда, инверсионный слой под действием измерительного сигнала изменяется слабо. В этих условиях емкость МДП – структуры равна C_{min} и не зависит от напряжения смещения (см. рис 2.1, кривая 2), т.к. ширина ОПЗ, определяющая $C_{л}$, остается неизменной.

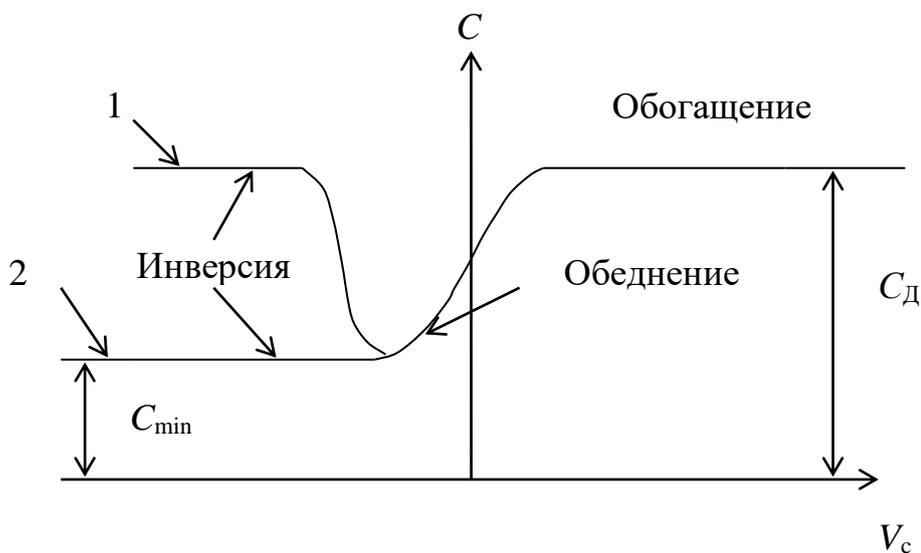


Рисунок 2.1 – Вольт-фарадная характеристика МДП – структуры на низкой (1) и высокой (2) частоте

На рисунке 2.2. приведены вольт-фарадные характеристики МДП – структуры алюминий-двуокись кремния-кремний (Al - SiO₂ – Si) при различных толщинах диэлектрика. Эти характеристики рассчитаны без учета заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях и разности работ выхода электронов из алюминия и кремния.

Экспериментальные кривые будут смещены относительно приведенных на рисунке 2.2 по оси напряжений. Величина смещения ΔV_s зависит от заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях (разность работ выхода электронов из алюминия и кремния очень мала). Плотность этого заряда связана с напряжением смещения ΔV_s выражением

$$Q_s = \frac{C_T \cdot \Delta V_s}{s}. \quad (2.3.)$$

Разделив поверхностную плотность заряда на заряд электрона ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл), получим эффективную плотность поверхностных состояний

$$N_s = \frac{Q_s}{e}. \quad (2.4.)$$

Знак Q_s можно определить по направлению сдвига реальной вольтфарадной характеристики относительно расчетной: положительному заряду соответствует сдвиг в направлении отрицательных значений напряжения и наоборот.

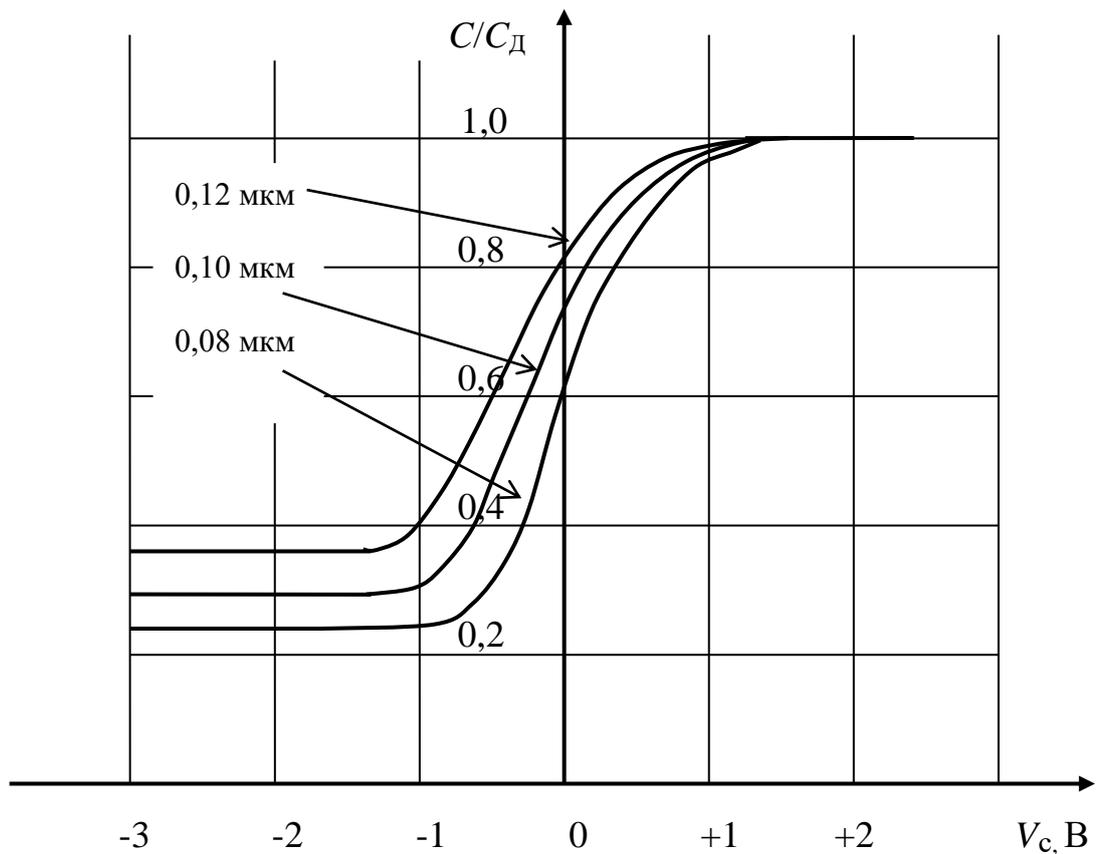
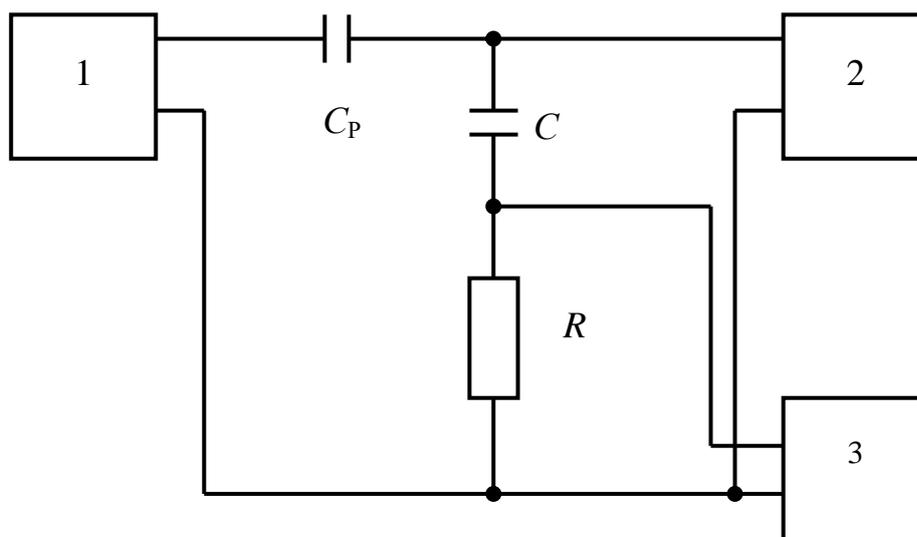


Рисунок 2.2 – Вольтфарадные характеристики идеальной МДП – структуры при различных толщинах диэлектрика

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящей работе измерение емкости МДП – структуры проводится методом делителя напряжения. Делитель образован емкостью МДП – структуры C и измерительным сопротивлением R (рисунок 3.1).



1 –высокочастотный генератор; 2 – источник постоянного напряжения; 3 – милливольтметр.

Рисунок 3.1 – Структурная схема установки для измерения вольтфарадных характеристик

С выхода высокочастотного генератора через разделительный конденсатор C_p на делитель подается синусоидальное напряжение (не более 25 мВ). Частота измерительного сигнала ω , C_p , R выбраны так, что

$$\omega \cdot C_p \gg \omega \cdot C \text{ и } R \ll \frac{1}{\omega \cdot C},$$

т.е. ток в измерительной цепи и, соответственно, падение напряжения на измерительном сопротивлении R определяются емкостью C . Прибор, регистрирующий падение напряжения на сопротивлении, проградуирован в единицах измерения емкости. Поэтому перед началом работы производится калибровка этого прибора, для чего вместо МДП – структуры подключается конденсатор известной емкости.

Образец для исследования представляет собой структуру Al – SiO₂ – Si. При измерении вольтфарадной характеристики напряжение смещения следует изменять от + 5 до – 5 В. Отключение и подключение МДП – структуры необходимо производить при напряжении смещения равном нулю.

4 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Измерить вольтфарадную характеристику для предложенного образца.

4.2. По вольтфарадной характеристике определить емкость диэлектрика и по формуле (2.2) вычислить его толщину. Принять для диоксида кремния $\epsilon_d = 3,5$. Площадь затвора (металлического электрода) $S = \pi \cdot r^2$, где $r = 0,05$ см.

4.3. Построить экспериментальную и соответствующую ей теоретическую вольтфарадные характеристики в координатах $C/C_d = f(V)$.

4.4. По смещению экспериментальной $C(V)$ кривой относительно теоретической при $V=0$ рассчитать плотность поверхностного заряда и эффективную плотность поверхностных состояний в диэлектрике.

4.5. Определить тип проводимости полупроводника, знак заряда в диэлектрике и сформулировать выводы.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Что называют обогащением, обеднением, инверсией проводимости приповерхностного слоя полупроводника?

5.2. Объясните вид низко- и высокочастотной вольтфарадных характеристик МДП – структуры.

5.3. Что такое поверхностные состояния?

5.4. Каковы причины сдвига экспериментальной вольтфарадной кривой относительно теоретической?

5.5. Каким образом начальный изгиб энергетических зон на поверхности полупроводника влияет на величину и знак поверхностного заряда?

5.6. Как по вольтфарадной характеристике МДП – структуры определить тип проводимости полупроводника и емкость диэлектрика?

5.7. Объясните метод измерения емкости, используемый в настоящей работе.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973. с. 347-383.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.,: 1980. 347с.
3. Несмелов Н.С., Славникова М.М., Широков А.А. Физические основы микроэлектроники. Томск, ТУСУР, 2007. с. 276

4. Елифанов Г. И. Физика твердого тела: Учебное пособие для вузов. Спб. Лань, 2011. - 288с. 978-5-8114-1001-9ISBN. [Электронный ресурс]: электронная версия. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=2023 (дата обращения: 15.12.2017)
5. Шалимова К.В. Физика полупроводников: 4-е изд., стер., - Спб. Лань, 2010. 384с. 978-5-8114-0922-8ISBN.