

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

С. И. Харитонов, А. Г. Саноян

**Практические задания по интегральной оптике
(полупроводниковые лазеры)**

Электронное учебно-методическое пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 1 «Совершенствование образовательной деятельности» Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы по проекту «Разработка магистерской программы «Технологии наноэлектроники и микросистемной техники» для направления подготовки 010900.68 «Прикладные математика и физика»
Соглашение № 1/10 от 3.06. 2013 г.

САМАРА
2013

УДК 539.1(075)+621.38(075)

ББК 32.86я7

х 207

Авторы: Харитонов Сергей Иванович,
Саноян Ашот Геворкович

Редакторская обработка С. И. Харитонов
Компьютерная верстка С. И. Харитонов
Доверстка С. И. Харитонов

Харитонов С. И., Практические задания по интегральной оптике (полупроводниковые лазеры) [Электронный ресурс] : электрон. учеб. метод. пособие / С. И. Харитонов, А. Г. Саноян; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. и граф. дан. (0,5 Мбайт). - Самара, 2013. -1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Приведены практические задания по разделу «Полупроводниковые лазеры» курса «Интегральная оптика».

Электронное учеб. метод. пособие предназначено для подготовки магистров направления 010900.68 «Прикладные математика и физика» радиотехнического факультета, изучающих дисциплину «Интегральная оптика» в 11 семестре.

Разработано на кафедре наноинженерии.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ К РАЗДЕЛУ “ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ”	4
2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ “ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ”	13
СПИСОК ТЕРМИНОВ	15
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	23
ПРИЛОЖЕНИЕ № 1. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ	24

1. ЗАДАЧИ И УПРАЖНЕНИЯ К РАЗДЕЛУ “ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ”

№ 2.1.

Почему полупроводниковый светоизлучающий диод имеет ширину линии порядка сотен ангстрем, в то время как полупроводниковый лазер имеет ширину линии порядка 1 ангстрем?

№ 2.2.

Какие два основных условия относительно механизма усиления должны быть выполнены, чтобы изготовить полупроводниковый лазер?

№ 2.3.

До какой степени (и каким образом) можно сколлимировать излучение полупроводникового лазера?

№ 2.4. Почему полупроводниковым лазерам свойственна более высокая эффективность, чем светодиодам?

№ 2.5. Какие энергии устанавливают коротковолновые и длинноволновые пределы излучательного спектра лазера?

№ 2.6. Нарисуйте три различных графика спектра излучения лазерного светодиода, которые показывают зависимости интенсивности света на выходе от длины волны:

- а) ниже порога;
- б) пороговое;
- в) выше порога.

№ 2.7. Вычертите энергетическую зонную диаграмму для p-n перехода лазера при прямом напряжении смещения и покажите область инверсной населенности.

№ 2.8. Определить соотношение населенностей уровней n_2/n_1 полупроводника в равновесном состоянии при следующих длинах волн λ и абсолютных температурах T :

- $\lambda=1,0$ мкм, $T=300$ К;

- $\lambda=0,85$ мкм, $T=77$ К;

$\lambda=3,2$ мкм, $T=77$ К.

№ 2.9.

Определить длину резонатора L лазера, чтобы на волне $\lambda=1,5$ мкм обеспечить расходимость пучка θ :

$-0,5^\circ$;

-5° ;

-40° .

№ 2.10.

Определить длину открытого резонатора l , для которой может быть выполнено условие самовозбуждения лазера при коэффициенте усиления среды α и коэффициенте потерь на зеркалах R :

$-\alpha = 300 \text{ м}^{-1}$, $R=0,8$;

$-\alpha = 800 \text{ м}^{-1}$, $R=0,33$;

$-\alpha = 3500 \text{ м}^{-1}$, $R=0,2$.

№ 2.11.

Определить длинноволновую («красную») границу фотоэффекта полупроводника на основе следующих материалов:

-кремний (ширина запрещенной зоны $\Delta E_g=1,8 \cdot 10^{-22}$ Дж);

-германий (ширина запрещенной зоны $\Delta E_g=1,17 \cdot 10^{-22}$ Дж);

-GaInAs (ширина запрещенной зоны $\Delta E_g=1,24 \cdot 10^{-22}$ Дж).

№ 2.12. Определить скорость движения носителя заряда (электронов и дырок) в различных полупроводниковых материалах при различных значениях напряженности электрического поля: E (В/м)=а) 10^2 ; б) 10^3 ; в) 10^4 ; г) 10^6 .

№ варианта		1	2	3	4
Тип полупроводникового материала		Si	Ge	InSb	GaAs
Подвижность носителя заряда, $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.	электроны	0.135	0.382	7.74	
	дырки	0.040	0.183	0.13	

№ 2.13. Определить время прохождения носителями заряда (электроны и дырки) слоя полупроводникового материала толщиной d при значениях напряженности электрического поля: E (В/м)= а) 10^2 ; б) 10^3 ; в) 10^4 ; г) 10^6 .

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d, \text{мкм}$	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0	50.0

Примечание: при решении воспользоваться данными и результатами задачи № 8.4.1.

№ 2.14. Определить длину волны излучаемого кванта света λ (в вакууме) для случая прохождения процессов рекомбинации в собственных полупроводниках.

№ варианта	1	2	3	4
Тип полупроводникового материала	Si	Ge	InSb	GaAs
Ширина запрещенной зоны (при $T = 300 \text{ K}$), эВ.	1.21	0.72	0.17	1.42

№ 2.15. Определить значение коэффициента рекомбинации γ для случая собственных полупроводников при значениях напряженности электрического поля: $E \text{ (В/м)} = \text{а) } 10^2$; б) 10^3 ; в) 10^4 ; г) 10^6 .

№ варианта	1	2	3	4
Тип полупроводникового материала	Si	Ge	InSb	GaAs
Подвижность электронов - μ , $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.	0.135	0.382	7.74	

Примечание: принять, что радиус эффективного взаимодействия электрона зоны проводимости с дыркой валентной зоны равен 10^{-10} м .

№ 2.16. Определить величину отношения скорости рекомбинации к скорости генерации носителей зарядов (R/G_0) для собственных полупроводников при значениях напряженности электрического поля: $E \text{ (В/м)} = \text{а) } 10^2$; б) 10^3 ; в) 10^4 ; г) 10^6 .

№ варианта	1	2	3	4
Тип полупроводникового материала	Si	Ge	InSb	GaAs

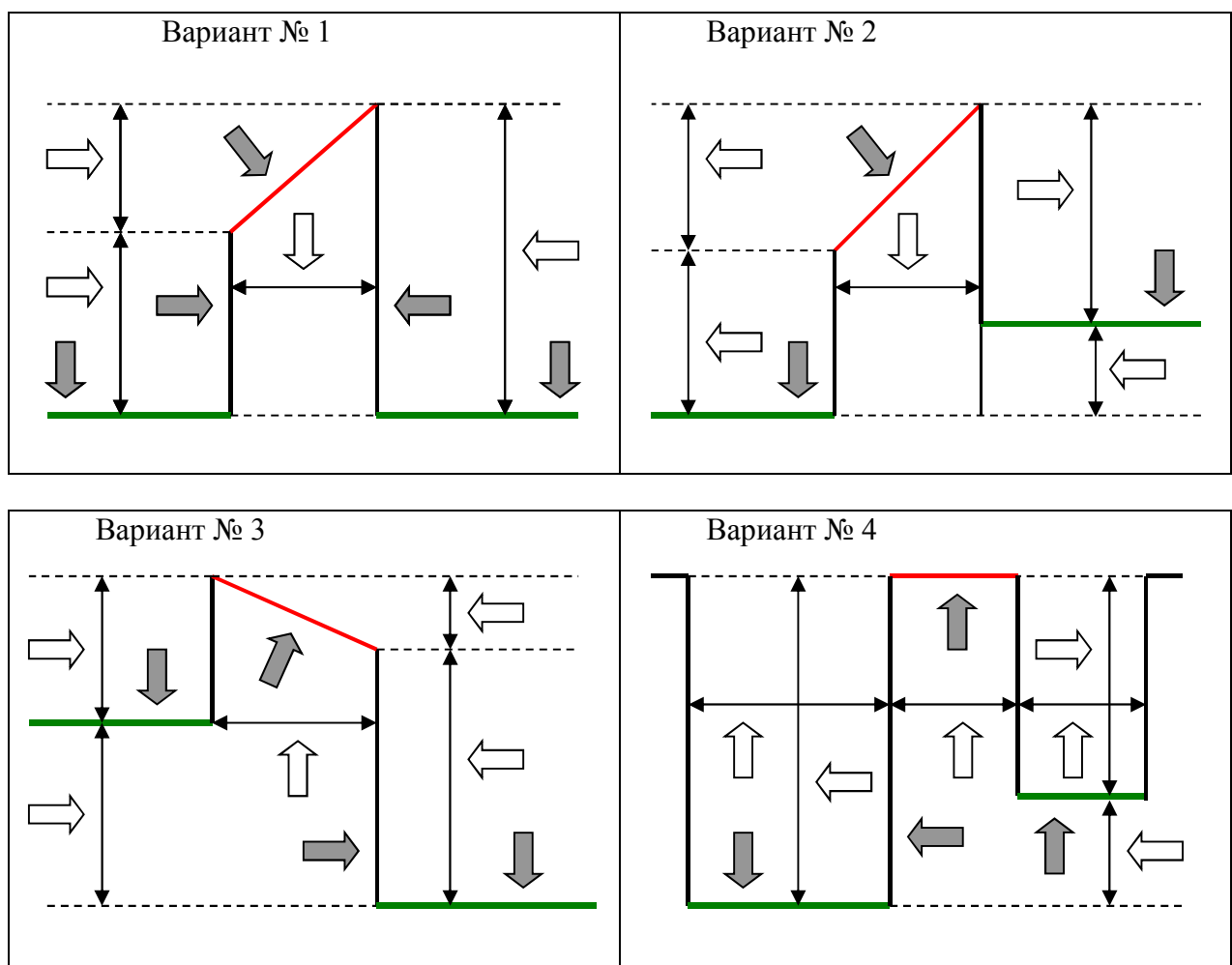
№ 2.17. Определить время жизни избыточных (неравновесных) носителей зарядов для случая собственных полупроводников (по выбору: Si; Ge; InSb; GaAs) при различных значениях параметра $\frac{(N_c \cdot N_v)^{1/2}}{2 \cdot G_0}$.

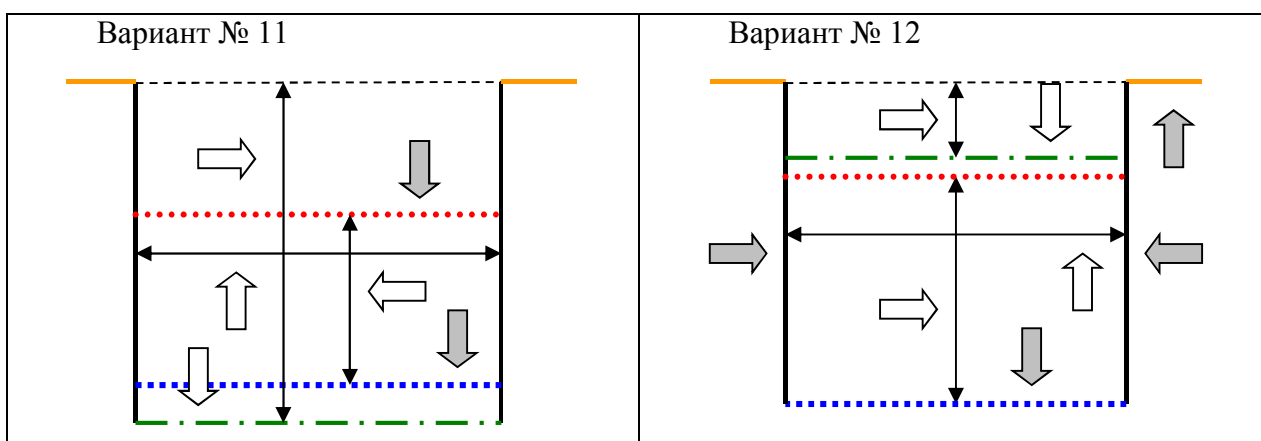
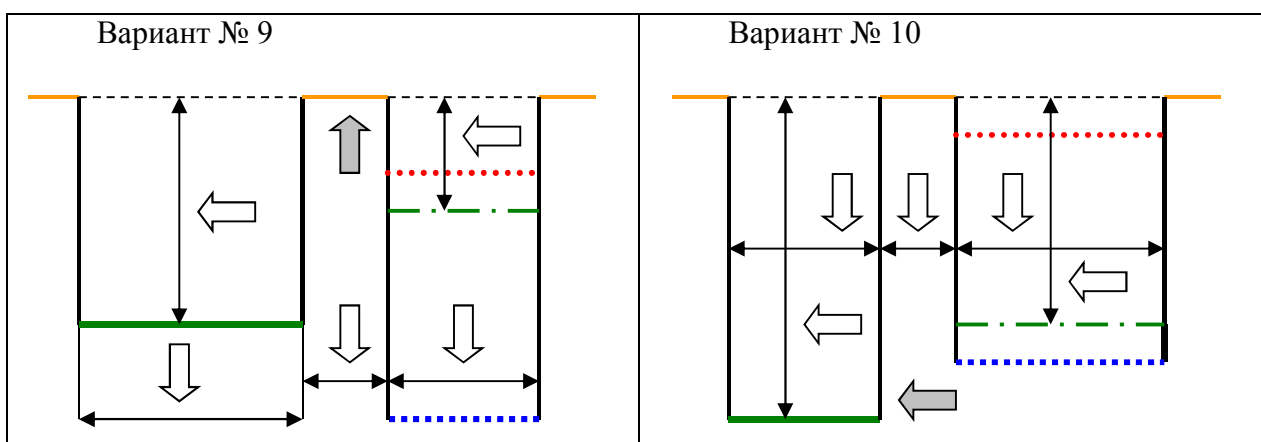
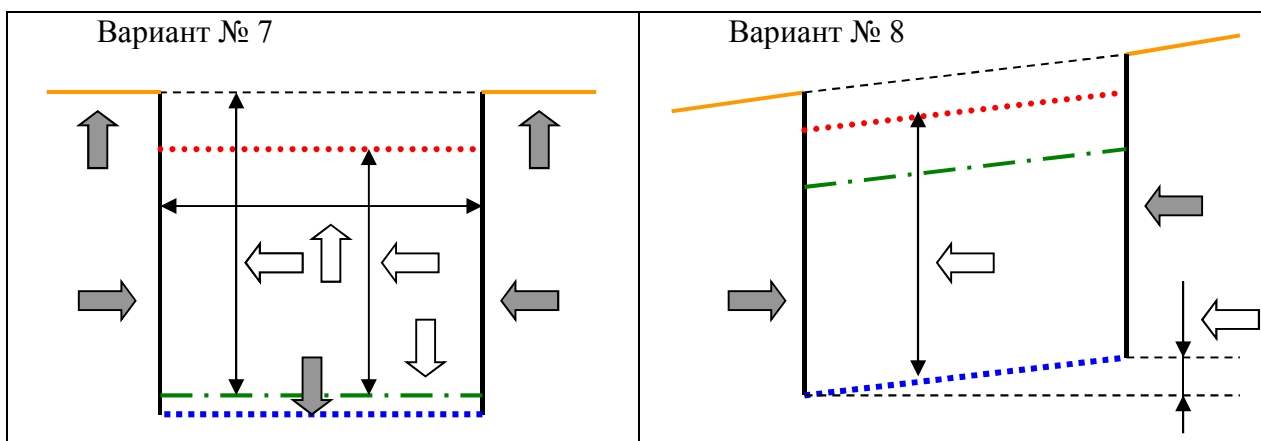
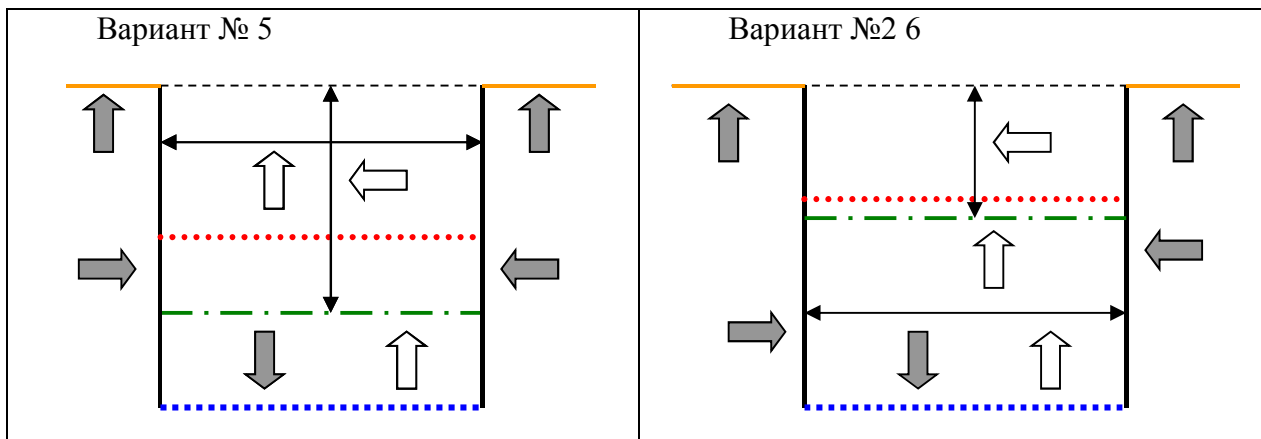
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{(N_c \cdot N_v)^{1/2}}{2 \cdot G_0}, \text{ с}$.	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8

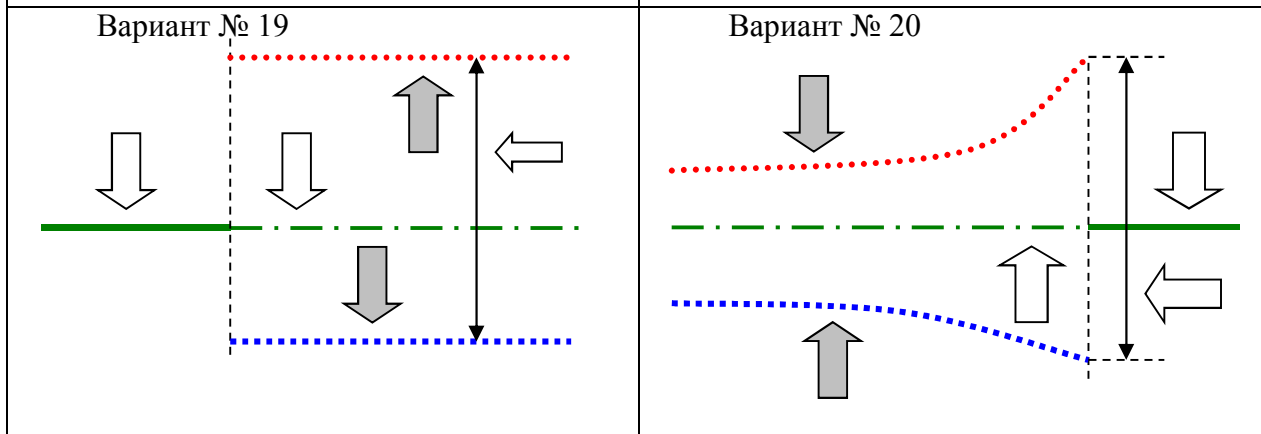
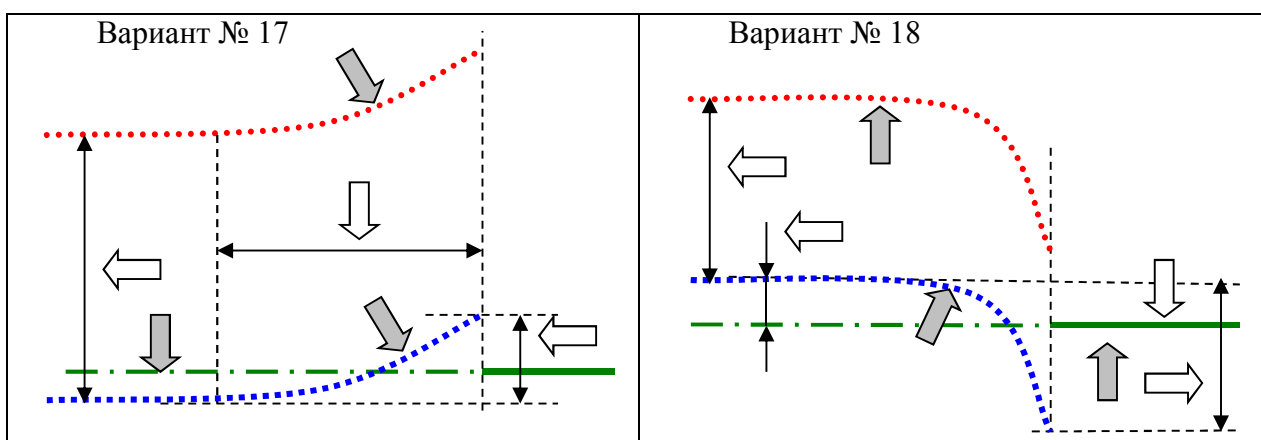
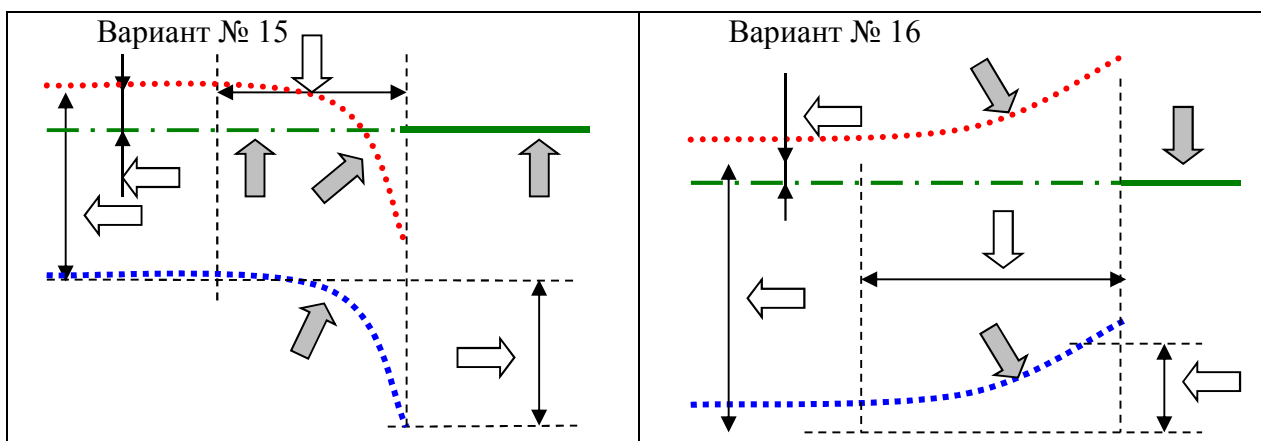
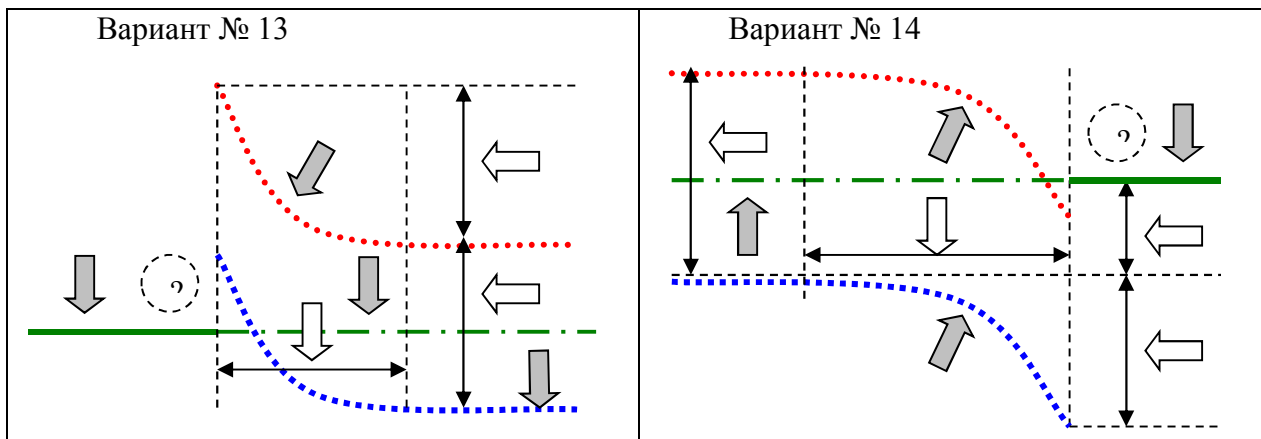
№ 2.18. Определить время жизни избыточных носителей зарядов для случая слабо легированных (по выбору: донорных или акцепторных) полупроводников (по выбору: Si; Ge; InSb; GaAs) при различных значениях скорости генерации неравновесных носителей зарядов G .

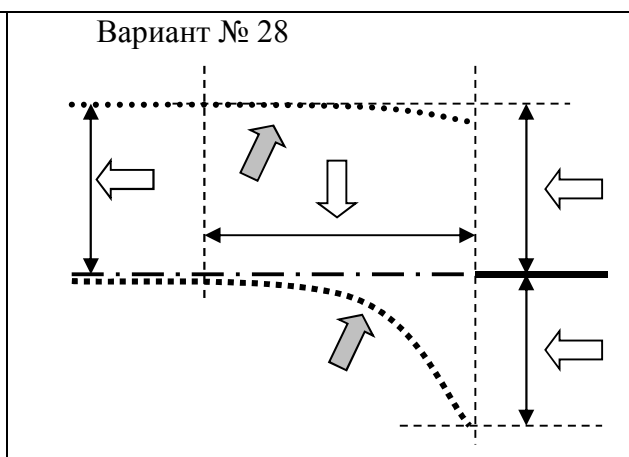
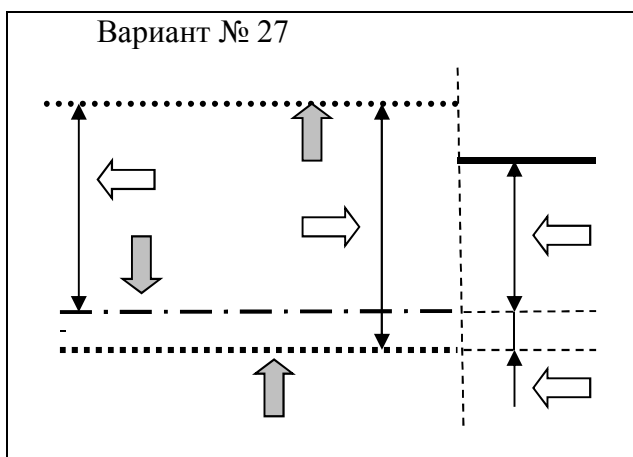
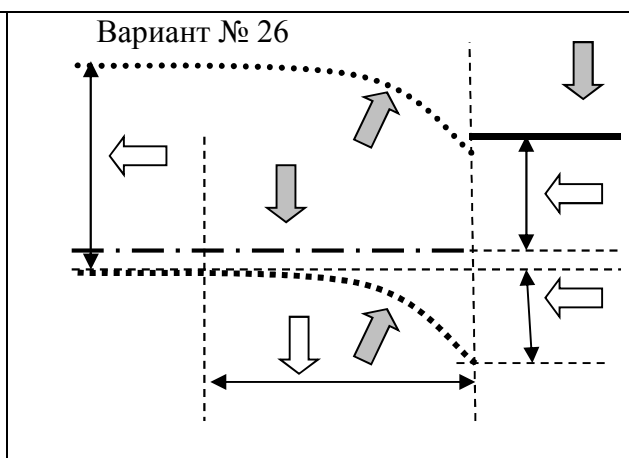
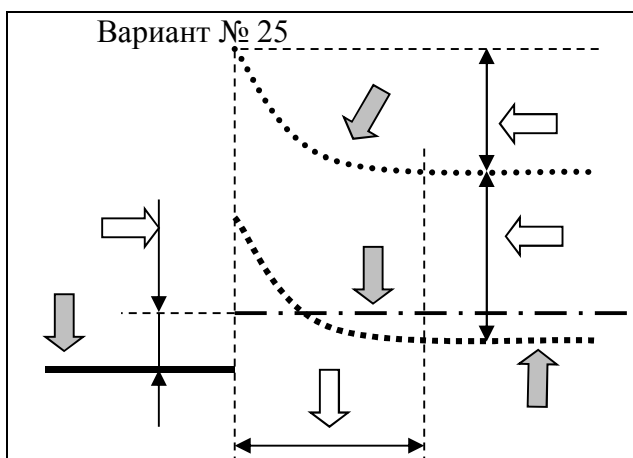
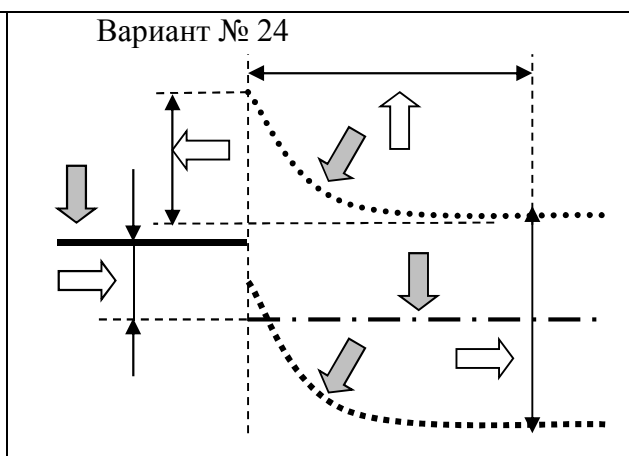
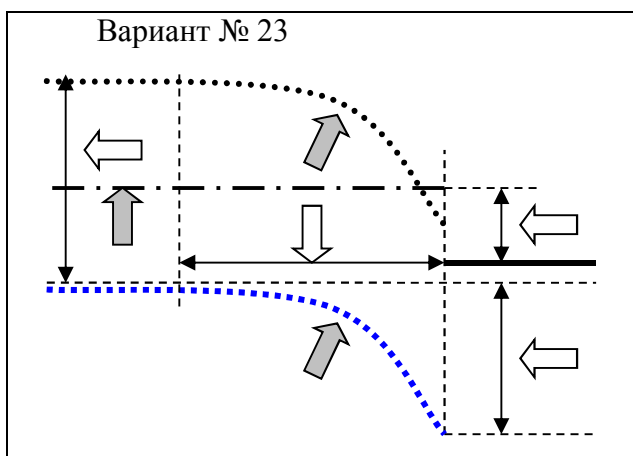
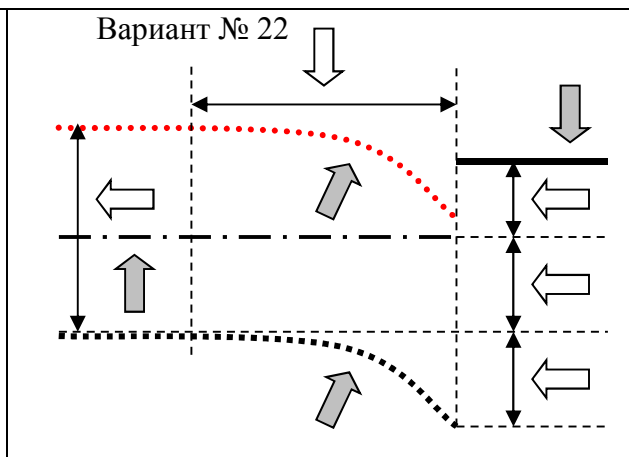
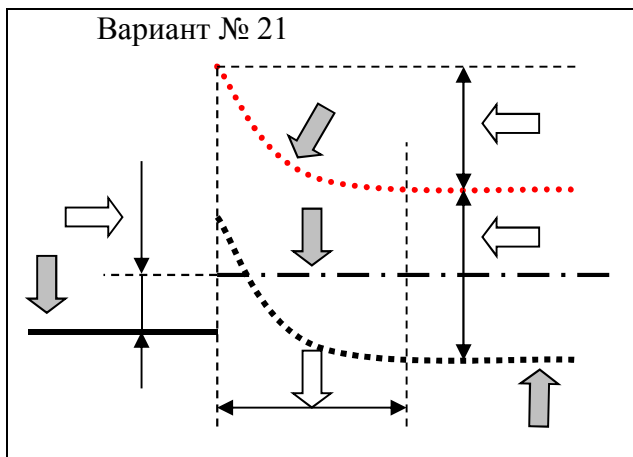
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$G, \text{с.}$	10^1	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{12}	10^{16}	10^{20}

№ 2.19. Провести анализ представленных ниже зонных энергетических диаграмм контактных твердотельных систем, выполненных на основе металлов и полупроводников (методология анализа представлена в Приложении).









№ 2.20. Построить зонные энергетические диаграммы для контактных твердотельных систем, выполненных на основе металлов и полупроводников (методология построения диаграмм представлена в приложении №4).

Вариант № 1 Система “ $M_1 - M_2$ ”		Вариант № 2 Система “ $M_1 - M_2$ ”		
А). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4.5 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 1.0 \text{ эВ.}$ $d = 10 \text{ А.}$	Б). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 4.0 \text{ эВ.}$ $d = 20 \text{ А.}$	А). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3.0 \text{ эВ.}$ $U_1 = 0 \text{ В. ; } U_2 = + 3 \text{ В.}$	Б). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 4.0 \text{ эВ.}$ $U_1 = 0 \text{ В. ; } U_2 = + 2 \text{ В.}$	
В). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4.0 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 4.0 \text{ эВ.}$ $d = 30 \text{ А.}$	Г). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 0.5 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3.0 \text{ эВ.}$ $d = 40 \text{ А.}$	В). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4.0 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3.0 \text{ эВ.}$ $U_1 = 0 \text{ В. ; } U_2 = - 4 \text{ В.}$	Г). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 0.5 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3.0 \text{ эВ.}$ $U_1 = 0 \text{ В. ; } U_2 = - 5 \text{ В.}$	
Вариант № 3 Система “ $M_1 - M_2 - M_3$ ”				
А). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$	Б). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 1 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$	В). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 1 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 4 \text{ эВ.}$	Г). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$	Д). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 6 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 0 \text{ эВ.}$
Е). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 4 \text{ эВ.}$	Ж). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 0 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$	З). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 0 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$	И). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 2 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$	К). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 1 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ.}$ $W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$
Вариант № 4 Система “ $M_1 - M_2 - M_3$ ”.				
А). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 2} = 1 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 3} = 3 \text{ эВ.}$ $U_1 = 1 \text{ В. ; } U_2 = 0 \text{ В. ; } U_3 = - 2 \text{ В}$		Б). $W_{\text{ВЫХ } 1} = 2 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 3} = 1 \text{ эВ.}$ $U_1 = 1 \text{ В. ; } U_2 = 0 \text{ В. ; } U_3 = - 2 \text{ В}$		
В) $W_{\text{ВЫХ } 1} = 2 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 2} = 1 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 3} = 3 \text{ эВ.}$ $U_1 = 5 \text{ В. ; } U_2 = 4 \text{ В. ; } U_3 = - 3 \text{ В}$		Г) $W_{\text{ВЫХ } 1} = 1 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 2} = 2 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 3} = 3 \text{ эВ.}$ $U_1 = 1 \text{ В. ; } U_2 = 0 \text{ В. ; } U_3 = 2 \text{ В}$		
Д) $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 2} = 2 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 3} = 3 \text{ эВ.}$ $U_1 = 1 \text{ В. ; } U_2 = 6 \text{ В. ; } U_3 = - 1 \text{ В}$		Е) $W_{\text{ВЫХ } 1} = 4 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 2} = 3 \text{ эВ; } W_{\text{ВЫХ } 3} = 3 \text{ эВ.}$ $U_1 = 1 \text{ В. ; } U_2 = 2 \text{ В. ; } U_3 = - 1 \text{ В}$		
Вариант № 5 Система « $M - \Pi / \Pi_i$ »				
А). $W_M = 4.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 3 \text{ эВ.}$	Б). $W_M = 1.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$	В). $W_M = 1.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 4.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 1 \text{ эВ.}$	Г). $W_M = 0.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 0.5 \text{ эВ.}$	
Д). $W_M = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 0 \text{ эВ.}$	АЕ). $W_M = 1 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 1 \text{ эВ.}$	Ж). $W_M = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 3.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$	З). $W_M = 2 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 3 \text{ эВ.}$	
Вариант № 6 Система « $M - \Pi / \Pi_d$ ».				
А). $W_M = 4.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 3 \text{ эВ.}$	Б). $W_M = 1.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$	В). $W_M = 1.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 4.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 1 \text{ эВ.}$	Г). $W_M = 0.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 0.5 \text{ эВ.}$	
Д). $W_M = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 0 \text{ эВ.}$	АЕ). $W_M = 1 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 1 \text{ эВ.}$	Ж). $W_M = 2.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 3.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$	З). $W_M = 2 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 3 \text{ эВ.}$	
Вариант № 7 Система « $M - \Pi / \Pi_a$ »				
А). $W_M = 4.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 3 \text{ эВ.}$	Б). $W_M = 1.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 2 \text{ эВ.}$	В). $W_M = 1.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 4.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 1 \text{ эВ.}$	Г). $W_M = 0.5 \text{ эВ.}$ $W_{\Pi / \Pi} = 1.0 \text{ эВ.}$ $\Delta W_{\Pi / \Pi} = 0.5 \text{ эВ.}$	

№ 2.21 Оценить 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 $n = 3,6$.

№ 2.22. Ширина запрещенной зоны слаболегированного GaAs при комнатной температуре 1,43 эВ. Когда материал сильно легирован (до вырождения) появляются “хвосты состояний”, которые эффективно уменьшают ширину запрещенной зоны на 8 %. Определить разницу в излучаемой длине волны света в случае слабого и сильного легирования.

2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ “ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ ”

1. В каких полупроводниковых соединениях вероятность излучательной рекомбинации больше?

- А) Непрямозонных;
- Б) Прямозонных;
- В) Широкозонных;
- Г) Во всех выше перечисленных.

2. Каким образом в полупроводниковом лазере формируется резонатор, необходимый для усиления когерентного излучения?

- А) С помощью зеркала.
- Б) Путем шлифовки граней кристалла.
- В) Нанесением специального покрытия.
- Г) Все выше перечисленные.

3. Какая область является активной в полупроводниковом лазере?

- А) $p-n$ переход.
- Б) p - типа.
- В) n - типа.
- Г) Все выше перечисленные.

4. Какие преимущества дает реализация полупроводникового лазера на гетероструктурах?

- А) Уменьшение пороговой плотности тока.
- Б) Снижение входного сопротивления.
- В) Снижение входного тока.
- Г) Все выше перечисленные.

5. Какие группы светодиодов не используются в волоконной оптике?

- А) Красного цвета свечения.
- Б) Оранжевого и желтого цвета свечения.
- В) Зеленого цвета свечения.
- Г) Голубого и фиолетового цвета свечения.

6. На какой подложке формируются прямозонные светодиоды (красного излучения)?

- А) GaAs.
- Б) GaP.
- В) GaN.
- Г) ZnTe.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Перекрестные ссылки представленных терминов обозначаются с помощью подчеркивания шрифта.

Аберрация (*aberration*) - отклонение светового луча или его волнового фронта от теоретической траектории, предсказанной параксиальной теорией.

Абсолютно черное тело (*blackbody*) – тело (в радиометрии), которое поглощает всю падающую на него мощность излучения на всех длинах световых волн.

Аксиальная (продольная) мода (*axial mode, longitudinal mode*) —оптическая мода в лазере, соответствующая одной генерируемой дискретной длине волны.

Акусто-оптический модулятор света (*acousto-optic light modulator*) – ультразвуковой модулятор интенсивности света.

Амплитуда (*amplitude*) волны – максимальное значение отклонения периодического сигнала (в оптике – напряженности электрического поля).

Амплитудный коэффициент отражения и пропускания (*amplitude reflectance and transmittance*) – отношение амплитуды отраженного (прошедшего) света к амплитуде падающего света (редко используется при диффузном отражении или пропускании).

Антиотражающее покрытие (*antireflection coating*) – тонкопленочное покрытие с низким показателем преломления, наносимое с целью уменьшения мощности излучения, отраженной от поверхности (обычно имеет толщину в четверть длины волны).

Апертурная диафрагма (*aperture stop or limiting aperture*) – отверстие, как правило, круглое, которое ограничивает полную мощность излучения, входящую в рассматриваемую оптическую систему.

Баланса уравнение (*rate equations*) – система уравнений, описывающих динамику изменения энергетических параметров во времени у лазера (обычно пренебрегается структурой мод)

Бел (*bel*) – единица измерения логарифмического уровня мощности или амплитуды периодических и квазипериодических сигналов.

Белый шум (*white noise*) – сигнал, имеющий равномерную плотность распределения гармоник в частотном диапазоне от нуля до бесконечности.

Боковой луч (*marginal ray*) – в линзовой оптике - луч, проходящий через апертурную диафрагму оптической системы.

Болометр (*bolometr*) – в радиометрии – тепловой приемник (датчик) мощности оптического излучения, электрическое сопротивление которого зависит от температуры.

Брюстера закон (*Brewsters law*) – утверждение, что сумма угла Брюстера и соответствующего угла отражения равна $\pi/2$.

Брюстера окно (*Brewster window*) – в лазере – окно, расположенное под углом Брюстера, с целью минимизации потерь на отражение или поляризации выходного луча.

Брюстера угол (*Brewsters angle*) – угол падения луча на диэлектрик, при котором световой поток теоретически имеет нулевое отражение.

Видимый спектр (*visible spectrum*) – интервал длин волн, воспринимаемый человеческим глазом, границами которого принято считать 400 нм и 700 нм.

Внутримодовая дисперсия (*intramodal distortion*) – в оптической связи – искажение сигнала внутри одной моды, в частности, дисперсия одномодового волокна.

Волна (*wave*) световая – периодическое возмущение электромагнитного поля в пространстве.

Волна затухающая (*evanescent wave*) – волна, амплитуда которой уменьшается экспоненциально в рассматриваемом направлении.

Волновое число (*wavenumber*) – параметр волны, равный отношению 2π на длину волны. (В оптической спектроскопии - отношению единицы на длину волны).

Волновой вектор (*wave vector*) – волновое число, умноженное на единичный вектор в направлении распространения волны.

Волновой пакет (*wave packet*) – волновой объект, ограниченный в пространстве (или во времени) с размером области локализации приблизительно равной длине когерентности.

Волновой фронт (*wavefront*) – геометрическая поверхность, характеризующаяся одинаковым значением фазы аналитического представления волнового объекта.

Волокно со ступенчатым профилем (*step – index fiber*) – оптическое волокно, показатель преломления сердцевинки которого постоянен во всех направлениях.

Волоконный лазер или усилитель (*fiber laser or amplifier*) – лазер или оптический усилитель, активной средой которого является непосредственно оптическое волокно, в отличие от традиционного полупроводникового или твердотельного лазера.

Время когерентности (*coherence time*) – отношение длины когерентности к скорости света в рассматриваемой среде

Время срабатывания (*response time*) - интервал времени, который требуется для того чтобы выходной сигнал детектора уменьшился в e раз.

Вторичный максимум (*secondary maximum*) – максимум интенсивности (обычно слабый) в дифракционных процессах, который не является главным максимумом.

Высокочастотный фильтр (*high – pass filter*) – пространственный фильтр, устраняющий

низкие частоты при обработке оптических полей.

Гармоник генерация (*harmonic generation*) – использование нелинейной среды для генерации частот, кратных основной частоте падающего света.

Гауссов пучок (*Gaussian beam*) – пучок света, амплитудное распределение которого в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, может быть представлено с помощью функции распределения Гаусса.

Геометрическая оптика (*geometrical optics*) – лучевая оптика, в которой игнорируется волновая природа света.

Главный максимум (*principal maximum*) – центральный максимум интенсивности света при рассмотрении дифракционных процессов.

Глубина скин-слоя (*skin depth*) – глубина проникновения электромагнитной волны в электропроводящие среды, при которой интенсивность уменьшается в e раз.

Градиентное волокно (*graded – index fiber*) – или градиентный волновод – оптическое волокно, у которого показатель преломления сердцевины оптического канала описывается нормализованной функцией профиля.

Граница отсечки (*cutoff*) – наивысшая пространственная частота электромагнитного поля, которая может быть зарегистрирована в волноводном устройстве.

Гребенчатый волновод (*ridge waveguide*) – планарный волновод, образованный путем нанесения полосок диэлектрика на подложку или поверхность плоского волновода.

Групповая задержка (*group delay*) – время, необходимое для прохождения светового импульса (волнового пакета) определенного участка оптического волновода.

Групповая скорость (*group velocity*) – скорость распространения по волноводу единичного импульса света (волнового пакета).

Гооса-Генхена сдвиг (*Goos – Hanchtn shift*) – сдвиг фаз; между падающей и отраженной волной, который имеет место при полном внутреннем отражении.

Гюйгенса принцип (*Huygens principle*) – состоит в том, что каждая точка волнового фронта считается центром излучения элементарной сферической волны.

Дисперсия (*dispersion*) – зависимость любых оптических параметров волноводной среды от длины волны.

Дифракционная решетка (*diffraction grating*) – набор параллельных линий или штриховых элементов, нанесенных на подложку.

Диффузионный отражатель (*diffuse reflector*) – поверхность, которая рассеивает падающий свет во всех направлениях (обычно внутри полусферы).

Длина волны отсечки (*cutoff wavelengh*) – в волноводе – длина волны, отделяющая

область длин волн, при которых существует мода распространения определенного типа.

Длина когерентности (*coherence length*) – расстояние, на котором пучок света можно считать когерентным с точки зрения процессов интерференции.

Дробовый шум (*shot noise*) – шумовая составляющая сигналов в оптическом приемнике, обусловленная дискретным характером воздействия квантов света (квантовый шум).

Жидкий кристалл (*liquid crystal*) – жидкое состояние вещества (как правило, органического), молекулы которого частично упорядочены.

Запрещенная зона (*forbidden zone*) – интервал на энергетической зонной диаграмме кристаллических тел (полупроводники, металлы), в пределах которого функция плотности квантовых состояний (для электронов) имеет нулевое значение.

Запрещенный переход (*forbidden transition*) – относительно маловероятный (с позиции квантовой механики) переход электрона с одного энергетического уровня на другой.

Излучательная мода (*radiation mode*) – мода оптического волновода, не полностью сосредоточенная в сердцевине волновода и частично излучаемая во внешнюю среду.

Инверсная населенность (*population inversion*) – состояние вещества, при котором имеется большое количество электронов (атомов, ионов или молекул), находящихся в возбужденном (неравновесном) состоянии.

Интегральная оптика (*integrated optics*) – устройства передачи и обработки информации, функционирующие на основе оптических принципов.

Интенсивность (*intensity*) излучения – квадрат абсолютной величины напряженности электрического поля световой волны.

Интерференция (*interference*) – пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или более когерентных световых пучков.

Квантовый выход (*quantum efficiency*) – количество частиц (электроны, атомы, молекулы и т.д.), изменивших свое начальное состояние (возбуждение, выход, ионизация и т.д.), в результате воздействия на них единичного кванта света.

Когерентность (*coherence*) – фазовая синхронизация процесса испускания единичных квантов света приводящая к возникновению эффекта интерференции.

Коэффициент поглощения (*absorption coefficient*) – натуральный логарифм доли мощности, поглощенной единицей длины (толщины) материала.

Коэффициент пропускания (*transmittance*) – отношение мощности излучения, прошедшей через единицу длины (толщины) материала к мощности, падающей на поверхность.

Критический угол (*critical angle*) – наибольший угол падения (по отношению к нормали к поверхности), при котором наблюдается полное внутреннее отражение.

Лазер (*laser*) – устройство предназначенное для создания интенсивных когерентных непрерывных или импульсных пучков света, состоящее из оптически активной среды, системы накачки энергии и оптического резонатора.

Линейчатый спектр (*line spectrum*) – спектр оптических частот, состоящий из набора дискретных спектральных линий.

Локальная числовая апертура (*local numerical aperture*) – в градиентном волокне – числовая апертура в произвольной точке сердцевины градиентного волокна.

Межмодовая дисперсия (*intermodal distortion*) – дисперсия, связанная с различием групповых скоростей различных оптических мод.

Метастабильное состояние (*metastable state*) – в квантовой механике – относительно долгоживущее энергетическое состояние микрообъекта.

Мода (*mode*) – определенное, удовлетворяющее условию самосогласования, распределение электрического поля в оптическом волноводе или резонаторе, обладающее свойством усиливающей интерференции.

Мода подложки (*substrate mode*) – излучательная мода, распространяющаяся в подложке планарного волновода, а не в сердцевине оптического канала.

Модовая линза (*mode – index lens*) – линза в планарном волноводе, изготовленная путем изменения толщины волновода для получения необходимого распределения эффективного показателя преломления.

Модовый шум (*mode – partition noise or modal noise*) – шумовая составляющая сигнала в волноводе или лазере, обусловленная фактором обмена энергией между модами.

Моды утечки (*leaky ray or mode*) – моды, частично излучаемые во внешнюю среду из-за кривизны поверхности раздела сердцевины и оболочки.

Монолитное устройство (*monolithic device*) – в интегральной оптике – твердотельное опто-электронное устройство, изготовленное всецело в пределах одной подложки.

Найквиста частота (*Nyquist frequency*) – частота отсчетов (выборки) ниже которой невозможно записать (воспроизвести) сигнал или изображение без искажений.

Накачка (*pump*) – процесс подведения из внешнего источника энергии для возбуждения активного вещества лазера, с целью создания эффекта инверсной населенности.

Направляемые моды (*bound mode*) – в оптической связи – моды, распространяющиеся в сердцевине оптического волновода.

Нелинейная оптика (*nonlinear optics*) – эффект генерации волн, отличных от падающей волны, ввиду проявления фактора нелинейности у показателя преломления среды.

Область когерентности (*coherence area*) – пространственная область, в пределах которой

световой пучок можно считать когерентным в части эффектов интерференции.

Оболочечные моды (*cladding mode*) – излучательные моды оптического волновода, направляемые оболочкой а не сердцевинной волновода.

Одномодовый волновод (*monomode waveguide or single – mode waveguide*) – оптический волновод, размеры или нормированная разность показателей преломления которого настолько малы, что в нем распространяется только одна мода наименьшего порядка.

Оптический путь (*optical path*) – расстояние вдоль траектории, измеренное в единицах длины волны.

Оптический резонатор (*optical resonator*) – камера (полость) с отражающими стенками, реализующими многократное отражение светового пучка с целью получения эффекта усиливающей интерференции на определенных частотах.

Отражательная способность (*reflektance*) – отношение мощности излучения, отраженной поверхностью, к падающей мощности.

Параксиальное приближение (*paraxial approximation*) – приближение, при котором лучи света практически параллельны оси волновода и можно использовать приближение малых углов.

Поверхностная акустическая волна, ПАВ (*surface acoustic wave, SAW*) – волна, распространяющаяся в планарном волноводе для модуляции светового луча.

Показатель преломления (*index of refraction*) – отношение скорости света в вакууме к скорости света в рассматриваемой среде.

Поперечная мода (*transverse mode*) – для лазера или оптического волновода – мода характеризующаяся поперечным распределением электромагнитного поля.

Пороговая инверсия населенности (*threshold population inversion*) – инверсия населенности (в лазере), при которой усиление мощности равно потерям.

Постоянная распространения (*propagation constant*) – в оптическом волноводе – величина 2π , деленная на длину волны моды волновода.

Пространственная когерентность (*spatial coherence*) – свойство световых пучков создавать интерференцию при делении волнового фронта.

Профиль показателя преломления (*index profile*) – зависимость показателя преломления оптического волокна от координаты нормальной к его оси.

Равновесное распределение мод (*equilibrium mode distribution*) – распределение мощности по модам волокна, которое не изменяется вдоль волокна.

Радиус пучка (*beam radius*) – расстояние (о Гауссовом пучке) между положением максимума амплитуды и местом, где амплитуда уменьшается в e раз.

Разъемный соединитель, оптический разъем, коннектор (*connector*) – фиксатор, жестко соединенный на конце оптического волокна, позволяющий создавать разъемные соединения с другими элементами оптического канала связи.

Решетчатый элемент связи (ввода) (*grating coupler*) – в интегральной оптике – дифракционная решетка, нанесенная на планарный волновод для обеспечения ввода светового пучка.

Светоизлучающий диод, светодиод (*light – emitting diode*) – обратно смещенный полупроводниковый диод излучающий некогерентный свет.

Сердцевина волокна (*core*) – центральная область оптического волокна, каналирующая и направляющая световой поток.

Скользящий луч (*skew ray*) – луч света, не параллельный оптической оси волновода и не пересекающий ее.

Согласование мод (*mode matching*) – обеспечение условий, при которых распределение поля в лазерном пучке совпадает с распределением оптического поля резонатора.

Спектральная чувствительность (*spectral sensitivity of the eye*) – чувствительность приемного устройства как функция длины волны.

Степенной параметр профиля (*profile parameter*) – показатель степени в нормализованной функции профиля.

Степень когерентности (*degree of coherence*) – отношение $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ интерференционных полос, создаваемых двумя пучками света.

Сферическая волна (*spherical wave*) – волна, которая сходится в определенную точку или из нее расходится в безграничное пространство.

Съемник оболочечных мод (*cladding mode stripper*) – устройство (или материал), используемое для удаления оболочечных мод из оптического волновода.

Тепловой (темновой) шум (*thermal (dark) noise*) оптического приемника – шум, в результате хаотического (теплового) движения электронов в твердом теле.

Точечный источник (*point source*) – источник, размеры которого настолько малы (идеализация), что он не может быть разрешен оптической системой.

Угол отражения (*angle of reflection*) светового луча - угол между световым лучом, отраженным от поверхности, и нормалью к этой поверхности.

Угол падения (*angle of incidence*) светового луча - угол между световым лучом, падающим на поверхность, и нормалью к этой поверхности.

Угол преломления (*angle of refraction*) светового луча - угол между световым лучом, преломленным поверхностью, и нормалью к этой поверхности.

- Ультразвуковой модулятор света** (*ultrasonic light modulator*) – устройство, в котором используется дифракция на ультразвуковой волне для модуляции мощности пучка света.
- Условия ввода с ограничениями** (*restricted launch conditions*) – создание таких условий ввода светового пучка в сердцевину многомодового световода, при которых возбуждается только определенная часть мод.
- Устойчивости диаграмма** (*stability diagram*) – двумерная диаграмма области устойчивости электромагнитных колебаний в оптическом резонаторе.
- Фазовая пластинка** (*phase plate*) – пластинка. Которая имеет области переменной толщины для изменения фазы волнового фронта.
- Фазовая скорость** (*phase velocity*) монохроматической волны – скорость распространения волнового фронта волны.
- Фазовый объект** (*phase object*) – прозрачный объект, имеющий показатель преломления, отличный от показателя преломления окружающей среды.
- Ферма принцип** (*Fermat's principle*) – принцип, согласно которому оптический путь между двумя точками является экстремальным.
- Фильтр мод** (*mode filter or mode stripper*) – устройство или вещество, которое удаляет моды оболочки или моды распространения высокого порядка.
- Фотоэлектрический эффект** (*photoelectric effect*) – *внешний* – испускание фотоэлектронов в вакуум при освещении светом; *внутренний* – появление электронов в зоне проводимости (электропроводность).
- Фотоэлектрон** (*photoelectron*) – электрон, вырванный из тела или переведенный в зону проводимости в результате фотоэлектрического эффекта.
- Частотная характеристика** (*frequency response*) – зависимость отношения амплитуды выходного сигнала оптического приемника к амплитуде входного сигнала.
- Четвертьволновый слой** (*quarter – wave layer*) – тонкая напыленная пленка, оптическая толщина которой равна одной четверти длины волны, которая используется в качестве делителя светового потока или в качестве антиотражающего покрытия.
- Числовая апертура** (*numerical aperture*) – для линзы – синус половинного угла между боковым лучом и оптической осью; для *многомодового волновода* - синус половинного угла конуса лучей, направляемых волноводом; для *одномодового волновода* – аналогично многомодовому, за исключением того, что половинный угол определяется по уровню, при котором интенсивность света составляет $1/e^2$ часть от максимального значения.
- Ширина запрещенной зоны** (*band gap*) – энергетический интервал между зоной проводимости и валентной зоной в полупроводниках.

Ширина полосы (*bandwidth*) – интервал частот модуляции сигнала, за пределами которого чувствительность приемника (или проводимость оптического волновода) уменьшается до некоторого, наперед заданного, предела.

Шум (*noise*) – любое случайное возмущение (например: ток, напряжение и т.д.), искажающее искомый сигнал.

Эквивалентная мощность шума (*noise equivalent power (NEP)*) – для оптического приемника – входная мощность излучения, создающая выходной сигнал, равный среднему шуму.

Энергетическая освещенность (*irradiance*) – мощность излучения, падающая на единицу поверхности (Вт/см^2).

Энергетическая яркость (*radiance*) света - мощность излучения, испускаемая или рассеиваемая единичной поверхностью в единичный телесный угол.

Эффективный показатель преломления (*effective index of refraction*) – скорость света в вакууме, деленная на фазовую скорость моды в оптическом волноводе.

Рекомендуемая литература

(основные литературные источники помечены символом - *)

1. Хансперджер, Р., Интегральная оптика (теория и технология).[Текст]/ Р. Хансперджер пер. с англ. под ред. Сычугова В.А., изд. второе. - М.: Мир, 1997. - 397 с.
2. Тамир, Т. Волноводная оптоэлектроника.[Текст] / Т. Тамир, пер. с англ. под ред. Аникина В.И. - М.: Мир, 1991. - 575 с.
3. Кикоин, И.К. Таблица физических величин.[Текст] / И.К. Кикоин - М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
4. * Снайдер, А. Теория оптических волноводов.[Текст] / А. Снайдер, Дж. Лав, пер. с англ. под ред. Дианова Е.М., Шевченко В.В. - М.: Радио и связь, 1987. - 656 с.
5. * Ландсберг, Г.С., Оптика.[Текст]/Г.С. Ландсберг, 6-е изд. стер.- М.: Наука, 2003. - 842 с..
6. Унгер Х.-Г., Планарные и волоконные оптические волноводы.[Текст] / пер. с англ. под ред. Шевченко В.В., - М.: Мир, 1980. - 654 с.
7. *Ансельм, А. И., Введение в теорию полупроводников.[Текст] / А. И. Ансельм - СПб.: «Лань», 2008. – 624 с.
8. *Лебедев, А. И., Физика полупроводниковых приборов.[Текст] /А. И. Лебедев - М.: Физматлит, 2008 – 488 с.
9. Гуревич, А. Г., Физика твердого тела.[Текст] / А. Г. Гуревич - СПб.: Невский Диалект, 2004 – 320 с.
10. *Фейнман, Р., Фейнмановские лекции по физике, Вып. 3: Излучение. Волны. Кванты. [Текст]/ Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, пер. сангл. / под ред. Я. А. Смородинского. Изд. 5-е – М.: ЛКИ, 2008. – 240 с.
11. Гауэр, Дж., Оптические системы связи. [Текст]/Дж. Гауэр, пер. с англ. под ред.А. И. Ларкина., - М.:Радио и связь, 1989. - 504 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1 **Общие рекомендации по решению задач и упражнений**

В настоящем Приложении рассматриваются вопросы построения энергетических диаграмм в контактных системах с участием металлов и полупроводников. Материалы представлены в виде задач и упражнений (преимущественно в графическом виде).

В ряде графических примеров специально допущены ошибки в построении энергетических диаграмм. В этих, «неправильных», случаях необходимо обосновать физическую суть допущенных в приведенных рисунках противоречий.

Контактные явления в системах: "Металл №1 - Металл №2"

Построение энергетических диаграмм производится на основании зонных энергетических диаграмм металлов, принимающих участие в создании контактной системы. При построении энергетических диаграмм в контактных системах с участием только металлов необходимо учитывать следующие моменты:

- В начальный момент времени ($t = 0$) оба вещества имеют одинаковое расположение "0" энергетического уровня;
- После установления равновесия в системе оба металла имеют одинаковое расположение уровня Ферми;
- Вещество с меньшей работой выхода выступает в качестве эмиттера электронов, а вещество с большей работой выхода выступает в качестве акцептора электронов;
- После установления равновесия в контактной системе, приповерхностная область (толщиной порядка 1 Ангстрем) материал с меньшей работой выхода приобретает положительный заряд, а материал с большей работой выхода - отрицательный заряд;
- Величина поверхностного заряда, появляющаяся на поверхностях раздела (благодаря перешедшим электронам из вещества с меньшей работой выхода в вещество с большей работой выхода) в результате установления равновесия составляет по порядку величины 10^{12} электрон/см² (для справки: количество электронов находящихся на поверхности металла составляет по порядку величины 10^{15} электрон/см², а в объеме – 10^{23} электрон/см³);
- После установления равновесия в контактной системе в вакуумном зазоре устанавливается контактная разность потенциалов (КРП), обусловленная разностью работ выхода веществ, принимающих участие в создании контактной системы:
- Отрицательный потенциал внешнего источника электропитания (батареи) смещает уровень Ферми вещества вверх на величину равную $q \cdot U$, где: q - заряд электрона; U - потенциал внешнего источника.

Контактные явления в системах «Металл - Полупроводник».

Построение энергетических диаграмм производится на основании зонных энергетических диаграмм металлов и полупроводников, принимающих участие в создании контактной системы. При построения энергетических диаграмм в контактных системах с участием полупроводников (хотя бы в качестве одного из элементов системы) необходимо учитывать следующие моменты:

- Общая методология построения энергетических диаграмм контактных систем с участием полупроводников аналогична методике построения диаграмм для систем "Металл №1 - Металл №2";

- Основное отличие энергетических диаграмм контактных систем с участием полупроводников (в отличии от диаграмм контактных систем с участием только металлов) состоит в том, что объемная концентрация носителей зарядов в собственных ($10^{10} - 10^{14}$ электрон/см³) и примесных ($10^{15} - 10^{19}$ электрон/см³) полупроводниках гораздо ниже объемной концентрации носителей зарядов в металлах (10^{23} электрон/см³);

- В энергетических диаграммах контактных систем с участием полупроводников не отображается участок, соответствующий области вакуумного зазора (последнее обусловлено тем обстоятельством, что протяженность области вакуумного зазора – d (порядка 10 ангстрем) существенно меньше протяженности приповерхностной области объемного заряда в полупроводниках – d_n ($10^3 - 10^5$ ангстрем));

- Приповерхностная область объемного заряда в полупроводниках может быть обеднена (запорный слой) или обогащена основными носителями зарядов (зависит от того, какие носители зарядов приходят (уходят) в полупроводник в процессе установления термодинамического равновесия);

- На участке, соответствующем приповерхностной области объемного заряда в полупроводниках, отображается фактор изгиба энергетических уровней (зон), как реакция на тот факт, что на этом участке существует электрическое поле, способствующее образованию контактной разности потенциалов;

- Суммарная величина изгибов энергетических зон равна разности работ выхода полупроводников, образующих контактную систему;

В случае гетеропереходов (т.е. систем образованных путем контакта двух полупроводников, имеющих различную ширину запрещенной зоны) изгиб энергетических зон испытывает разрыв в области контакта двух сред.