

Вопросы экзаменационных билетов по курсу "ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ"  
для студентов ФАКИ III семестр 10/11 учебного года.

ВОПРОСЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

- ✓ Электронные состояния атомом и твердых тел:
  - Структура таблицы Д. И. Менделеева на примере электронных конфигураций элементов III, IV и V групп.
  - Двумерные (плоские) модели кристаллических решёток собственного и примесного полупроводника при ковалентных меж-атомных связях.
  - Электронная конфигурация атомов германия и кремния.
  - Образование энергетических зон при формировании кристаллической решётки германия и кремния.
  - Донорные и акцепторные примеси в элементах IV группы.
  - Энергетические зонные диаграммы, условия электрической нейтральности собственного, примесного *n*, *p*- и компенсированного полупроводника.
- ✓ Вычисление концентрации электронов и дырок, определение положения уровня Ферми в равновесном полупроводнике.
  - Функция распределения Ферми-Дирака. Уровень Ферми.
  - Расчёт максимальной плотности разрешенных состояний.
  - Произведение концентраций свободных носителей зарядов (СНЗ) для равновесного и неравновесного стационарных состояний.
- ✓ Вычисление концентрации СНЗ и определение положения уровня Ферми в примесном полупроводнике.
  - Энергетические зонные диаграммы собственного, примесного и компенсированного полупроводников.
  - Положение уровня Ферми в примесном *n* и *p*-полупроводнике.
  - Положение уровня Ферми и тип проводимости полупроводника.
- ✓ Электрический ток в полупроводниках. Уравнения переноса. Диффузионный и дрейфовый потоки и токи. Подвижность, дрейфовая скорость, скорость диффузии. Сопротивление, проводимость, удельное сопротивление, удельная проводимость полупроводника.
- ✓ Соотношение Эйнштейна. Вывод.
- ✓ Изгиб энергетических зон и напряжённость электрического поля. Вывод.
- ✓ Уравнения непрерывности:
  - Вывод уравнений непрерывности.
  - Решение уравнений непрерывности: определение пространственного распределения неосновных носителей заряда
    - для случая стационарной инжекции неосновных носителей заряда в полубесконечный полупроводниковый образец, диффузионная длина неосновных носителей заряда, время жизни;
    - для случая стационарной инжекции неосновных носителей заряда в полупроводниковый образец конечных размеров, приближение для размеров существенно меньших диффузионной длины неосновных носителей заряда, коэффициент переноса.

ВОПРОСЫ ПО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ДИОДАМ

- ✓ Электронно-дырочный *p-n* переход:
  - Формирование. Образование области пространственного заряда (ОПЗ).
  - Диффузионно-дрейфовое равновесие.
  - Энергетические зонные диаграммы, распределение концентрации свободных носителей заряда в зонах по энергиям, физические процессы при нулевом, прямом и обратном смещениях.
  - Формирование электронных и дырочных составляющих прямого тока проводимости. Роль (объемной) рекомбинации СНЗ при формировании постоянных и переменных токов проводимости. Формирование и структура прямого тока проводимости идеального и реального диодов. Влияние рекомбинации СНЗ в ОПЗ при прямом смещении и поля в базе при высоком уровне инжекции неосновных носителей заряда (ННЗ). Оценка напряжённости электрического поля в базе в зависимости от уровня инжекции ННЗ.
  - Обратный ток *p-n* перехода: механизм формирования, вывод соотношения, выражение обратного тока через диффузионные длины и коэффициенты диффузии ННЗ, через концентрации примесей, через темп тепловой генерации ННЗ. Формирование обратного тока проводимости идеального и реального диодов. Влияние генерации СНЗ в ОПЗ при обратном смещении.
  - Механизм управления током проводимости *p-n* перехода.
  - Пространственное распределение неосновных носителей заряда при прямом и обратном смещении. Решение соответствующих уравнений непрерывности.
  - Вывод вольтамперной характеристики (ВАХ) идеального *p-n* перехода. Допущения модели Шокли.
  - Сравнение вольтамперных характеристик германиевого, кремниевого и арсенид-галиевого *p-n* переходов.
  - Влияние рекомбинации СНЗ в ОПЗ при прямом смещении и поля в базе при высоком уровне инжекции ННЗ на ВАХ *p-n* перехода.
  - Влияние генерации СНЗ в ОПЗ при обратных смещениях на ВАХ *p-n* перехода. ВАХ в полулогарифмических координатах.
  - Вывод контактной разности потенциалов *p-n* перехода.
  - Вывод соотношений, связывающих концентрации (неравновесных) ННЗ с напряжением на переходе при малом уровне инжекции:  $n_p = n_{p0} \exp(U/U_T)$ ,  $p_n = p_{n0} \exp(U/U_T)$ .
  - Покажите, что соотношение между равновесными концентрациями основных и неосновных носителей заряда на *p-n* перехо-

де имеет следующий вид:  $n_{p_0} = n_{n_0} \exp(-U_0/U_T)$ ,  $p_{n_0} = p_{p_0} \exp(-U_0/U_T)$ , где  $U_0$  – контактная разность потенциалов.

- Объёмный пространственный заряд  $p$ - $n$  перехода: формирование, размеры области и степень легирования примесями, изменения размеров ОПЗ при изменении напряжения, условия электрической нейтральности.
- Напряжённость электрического поля в ОПЗ резкого  $p$ - $n$  перехода. Решение уравнений и график.

✓ Электронно-дырочный  $p$ - $n$  переход:

- Вычисление размеров области пространственного заряда резкого  $p$ - $n$  перехода.
- Диффузионная и барьерная ёмкости  $p$ - $n$  перехода. Определение. Вывод. Сравнение с конденсаторной ёмкостью.
- Барьерная ёмкость и (ёмкостной) ток смещения.
- Диффузионная ёмкость и комплексный переменный ток проводимости.
- Особенности заряда/разряда диффузионной ёмкости.

✓ Электронно-дырочный  $p$ - $n$  переход:

- Комплексная проводимость и малосигнальная эквивалентная схема полупроводникового диода.

✓ Туннельный и обращённый диоды:

- Энергетическая зонная диаграмма, распределение концентрации свободных носителей заряда в зонах, физические процессы при изменении смещения, формирование токов проводимости. Обоснование вольтамперных характеристик.

✓ Диод Шоттки:

- Формирование, свойства, энергетические зонные диаграммы выпрямляющего контакта *металл –  $n$ -полупроводник*.
- Энергетические зонные диаграммы, физические процессы выпрямляющего контакта при нулевом, прямом и обратном смещениях.
- Вывод вольтамперной характеристики для термоэмиссионной модели выпрямляющего контакта.
- Особенности диодов Шоттки: механизм проводимости, прямая и обратная ветви вольтамперной характеристики.
- Механизм управления током выпрямляющего контакта *металл –  $n$ -полупроводник*.
- Невыпрямляющий (омический, обогащённый) контакт металл –  $n$ -полупроводник, энергетические зонные диаграмма, свойства.
- Объёмный пространственный заряд выпрямляющего и невыпрямляющего (омического) контактов *металл- $n$ -полупроводник*: формирование, особенность размещения. Условие электрической нейтральности контакта.

## ВОПРОСЫ ПО БИПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРУ

✓ Биполярный транзистор (БТ): Статические параметры для схем с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ). Формирование и структура токов проводимости. Токи насыщения. Остаточные токи. Соответствующие распределения концентрации неосновных носителей заряда. Механизм управления током проводимости.

✓ Модель Эберса-Молла биполярного транзистора:

- Вывод уравнений постоянных токов проводимости. Различные представления уравнений.
- Статическая схема замещения. Обоснование модели.

✓ Биполярный транзистор: Определение и обоснование общего вида семейства входных и выходных вольтамперных характеристик для  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$  транзисторов.

✓ Входные вольтамперные характеристики биполярного  $p$ - $n$ - $p$  транзистора в схеме с ОБ:

- Определение. Аналитический вывод (пользуясь уравнениями Эберса-Молла). Характеристика общего вида семейства.
- Физическое и аналитическое обоснование сдвига характеристик при изменении параметра семейства.
- Характерные токи, области, точки, соответствующие распределения концентрации неосновных носителей заряда.
- Определить по семейству входных ВАХ, привести распределение концентрации неосновных носителей заряда и схемы измерения характерных токов и напряжений –
  - тока отсечки эмиттера  $I_{Э\text{отс}}$ ,
  - тока насыщения эмиттера  $I_{ЭС}$  (дырочной и электронной составляющей),
  - тока насыщения коллектора  $I_{КС}$  (дырочной составляющей),
  - напряжения холостого хода (плавающего потенциала) эмиттера  $U_{ЭБ0} \neq 0$  при большом обратном смещении коллектора,
  - тока прямого переноса  $I_N$ ,
  - тока инверсного переноса  $I_I$ .
- Рассчитать плавающий потенциал эмиттера  $U_{ЭБ0} < 0$  и соответствующее значение остаточного тока  $I_{КБ0}$  коллектор-база.

✓ Выходные вольтамперные характеристики биполярного  $p$ - $n$ - $p$  транзистора в схеме с ОБ:

- Определение. Аналитический вывод (пользуясь уравнениями Эберса-Молла). Характеристика общего вида семейства.
- Характерные токи, области, точки семейства; соответствующее распределение концентрации неосновных носителей заряда.
- Определить по семейству выходных ВАХ, привести распределение концентрации неосновных носителей заряда и схемы измерения характерных токов и напряжений –
  - тока прямого переноса  $I_N$ ,
  - тока насыщения коллектора  $I_{КС}$  (для дополнительной кривой  $U_{ЭБ} = 0$ ),
  - остаточного тока коллектор-база  $I_{КБ0}$ ,
  - тока отсечки коллектора  $I_{К\text{отс}}$  (для дополнительной кривой  $U_{ЭБ} = -\infty$ ),
  - дырочную составляющую тока насыщения эмиттера  $I_{ЭСП}$ ,
  - потенциала (холостого хода) коллектора  $U_{КБ0} \neq 0$  при большом обратном смещении эмиттера.
- Рассчитать плавающий потенциал коллектора  $U_{КБ0} < 0$  и соответствующее значение остаточного тока  $I_{ЭБ0}$  эмиттер-база.

✓ Входные вольтамперные характеристики биполярного  $p$ - $n$ - $p$  транзистора в схеме с ОЭ:

- Определение. Аналитический вывод (пользуясь уравнениями Эберса-Молла). Характеристика общего вида семейства.
  - Характерные токи, области, точки семейства; соответствующее распределение концентрации неосновных носителей заряда.
  - Физическое и аналитическое обоснование сдвига характеристик при изменении параметра семейства.
  - Объяснить, почему при обрыве вывода базы электрическая нейтральность базы сохраняется, несмотря на то, что через область базы протекает ток проводимости.
  - Показать (пользуясь уравнениями Эберса-Молла), что входная проводимость в схеме с ОЭ примерно в  $B_N$  раз меньше, чем в схеме с ОБ.
- 
- ✓ Выходные вольтамперные характеристики биполярного  $p-n-p$  транзистора в схеме с ОЭ:
    - Определение. Аналитический вывод (пользуясь уравнениями Эберса-Молла). Характеристика общего вида семейства.
    - Характерные токи, области, точки, соответствующее распределение концентрации неосновных носителей заряда.
    - Физическое и аналитическое обоснование сдвига характеристик при изменении параметра семейства.
    - Характерные токи, области, точки, соответствующее распределение концентрации неосновных носителей заряда.
    - Определить по семейству выходных ВАХ, привести распределение концентрации неосновных носителей заряда и схемы измерения остаточных токов коллектор-эмиттер  $I_{КЭО}$  и коллектор-база  $I_{КБО}$  (для дополнительной кривой  $I_3 = 0$ ).
    - Показать (пользуясь уравнениями Эберса-Молла), что выходная проводимость в схеме с ОЭ примерно в  $B_N$  раз больше, чем в схеме с ОБ.
- 
- ✓ Биполярный транзистор:
    - Структура токов проводимости в активном режиме в случае идеальных (модель Шотки) и реальных переходов.
    - Ток насыщения эмиттерного перехода. Формирование, структура, распределение концентрации неосновных носителей заряда, схема измерения.
    - Ток насыщения коллекторного перехода. Формирование, структура, распределение концентрации неосновных носителей заряда, схема измерения.
    - Распределение концентрации неосновных носителей заряда биполярного транзистора при прямом смещении на обоих переходах в схеме с ОБ и нулевом токе эмиттера.
    - Распределение концентрации неосновных носителей заряда биполярного транзистора в режиме отсечки.
    - Ток прямого переноса биполярного транзистора. Формирование, структура, схема измерения.
    - Остаточный ток эмиттер-база. Распределение концентрации неосновных носителей заряда при нулевом токе коллектора в схеме с ОБ и большом обратном смещении эмиттера. Расчёт соответствующего плавающего потенциала коллектора  $U_{КБО}$ .
    - Остаточный ток коллектор-база. Распределение концентрации неосновных носителей заряда при нулевом токе эмиттера в схеме с ОБ и большом обратном смещении коллектора. Расчёт соответствующего плавающего потенциала эмиттера.  $U_{ЭБО}$ .
    - Остаточные токи эмиттер-коллектор и коллектор-эмиттер. Распределение концентрации неосновных носителей заряда при холостом ходе базы для прямого и обратного смещений коллектора.
- 
- ✓ Физическое и аналитическое обоснование усилительных свойств биполярного транзистора ( $B_N \gg 1, \beta_N \gg 1$ ) в схеме с ОЭ.
- 
- ✓ Напряжение пробоя коллектора биполярного транзистора в схеме с ОЭ. Влияние положительной внутренней обратной связи (тока базы).
- 
- ✓ Энергетическая зонная диаграмма  $p^+-n-p$  биполярного транзистора в активном режиме. Соответствующее распределение концентрации неосновных носителей заряда.
- 
- ✓ Энергетическая зонная диаграмма  $n-p-n$  биполярного транзистора в активном режиме. Соответствующее распределение концентрации неосновных носителей заряда.
- 
- ✓ Динамические свойства биполярного транзистора (БТ).
    - Малосигнальная эквивалентная схема БТ. Обоснование.
    - Частотные зависимости коэффициентов передачи токов в схеме с ОБ и ОЭ. Граничные частоты.
    - Низкочастотная эквивалентная схема БТ, вывод  $h$ -параметров.

## ВОПРОСЫ ПО ПОЛЕВЫМ МОП-ТРАНЗИСТОРАМ

- 
- ✓ Принципы работы и структура ПТ. Классификация и особенности ПТ: полевые транзисторы с управляющим  $p-n$  переходом, МОП-транзисторы индуцированным и встроенным каналом.
- 
- ✓ Свойства структуры металл-окисел-полупроводник. Энергетические диаграммы и распределение зарядов структуры **металл-окисел- $p$ -полупроводник** для нулевого, прямого и обратного смещений. Состояний инверсии, обеднения, плоских зон, обогащения; заряд поверхности; поверхностный потенциал; напряжение плоских зон.
- 
- ✓ Расчёт концентрации свободных носителей заряда на поверхности раздела окисел-полупроводник через поверхностный потенциал.
- 
- ✓ Расчёт граничного потенциала инверсии и порогового потенциала сильной инверсии структуры **металл-окисел- $p$ -полупроводник**.
- 
- ✓ Расчет погонной плотности заряда электронов  $Q_n(y)$  инверсного слоя  $n$ -канального МОП-транзистора и проводимости канала.
- 
- ✓ Определение порогового напряжения затвора МОП-транзистора с индуцированным каналом.
- 
- ✓ Передаточные (сток-затворные) характеристики полевого МОП-транзистора с индуцированным каналом. Вывод. Сток-затворные характеристики полевого МОП-транзистора со встроенным каналом.
- 
- ✓ Выходные вольтамперные (стоковые) характеристики. Аналитический вывод, приближённые выражения, характерные области и параметры.
- 
- ✓ Емкости полевого МОП-транзистора с индуцированным каналом. Малосигнальная эквивалентная схема. Частотные свойства.
- 
- ✓ Дифференциальные параметры полевого МОП-транзистора с индуцированным каналом, соотношения между дифференциальными параметрами.

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13

Дисциплина *Полупроводниковые приборы* Кафедра *Радиоэлектроники и прикладной информатики*

- 0 **Задача.** Известны токи коллектора  $I_K$ , эмиттера  $I_E$ , и базы  $I_B$   $p-n-p$  БТ в активном режиме. Пренебрегая рекомбинацией неосновных носителей заряда в базе, определить ток прямого переноса  $I_N$ , если известна также электронная составляющая тока эмиттера  $I_{En}$ . Как изменится результат, если рекомбинацией неосновных носителей заряда в базе не пренебрегать ( $A_T \neq 1$ )?
1. **Полевой МОП-транзистор с индуцированным каналом.** Свойства структуры металл-окисел-полупроводник. Энергетические диаграммы и распределение зарядов структуры металл-окисел- $p$ -полупроводник для нулевого и обратного смещений. Состояний обеднения, инверсии, плоских зон. Поверхностный потенциал. Формирование канала. Расчет плотности поверхностного заряда и порогового напряжения затвора.
2. **Биполярный  $p-n-p$  транзистор.** Объяснить, почему в характерных точках семейства входных ВАХ в схеме с ОБ ток эмиттера  $I_E=0$ , а напряжение  $U_{ЭБ} \neq 0$ , если напряжение  $U_{КБ} \neq 0$ . Привести распределение концентрации неосновных носителей заряда в характерных точках семейства при нулевом токе эмиттера.
3. **Изгиб энергетических зон** полупроводника и напряжённость электрического поля.

Время для подготовки 40 – 50 минут, необходимое условие продолжения опроса – правильное решение задачи, можно пользоваться своими конспектами и литературой.