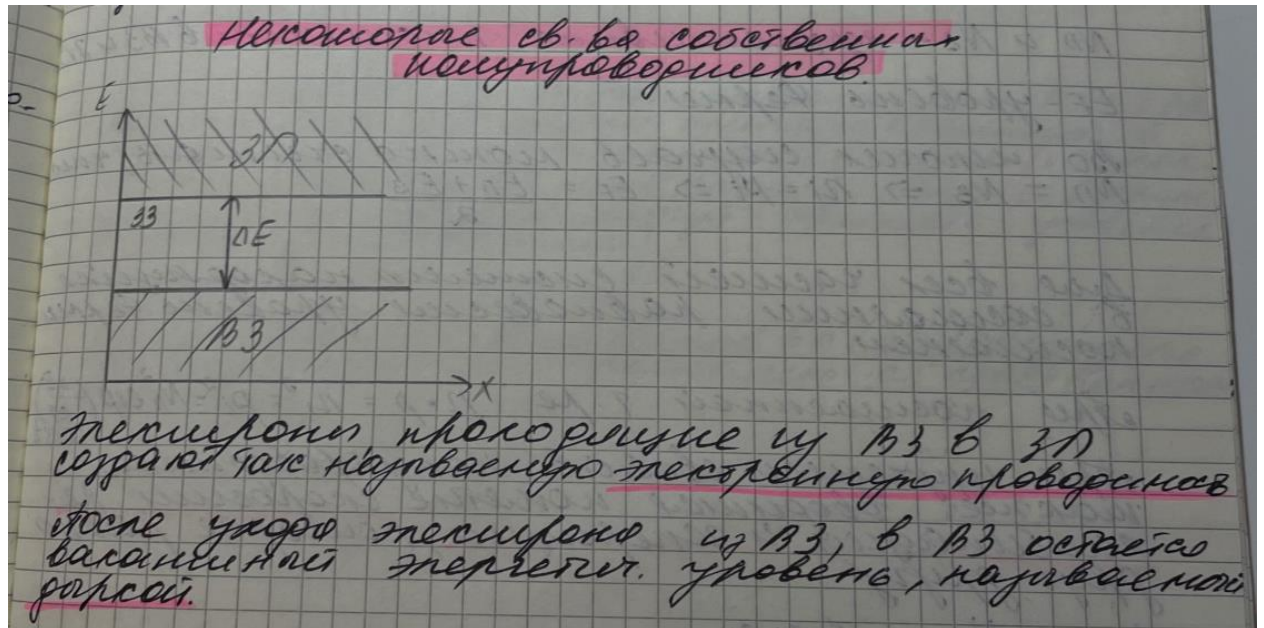


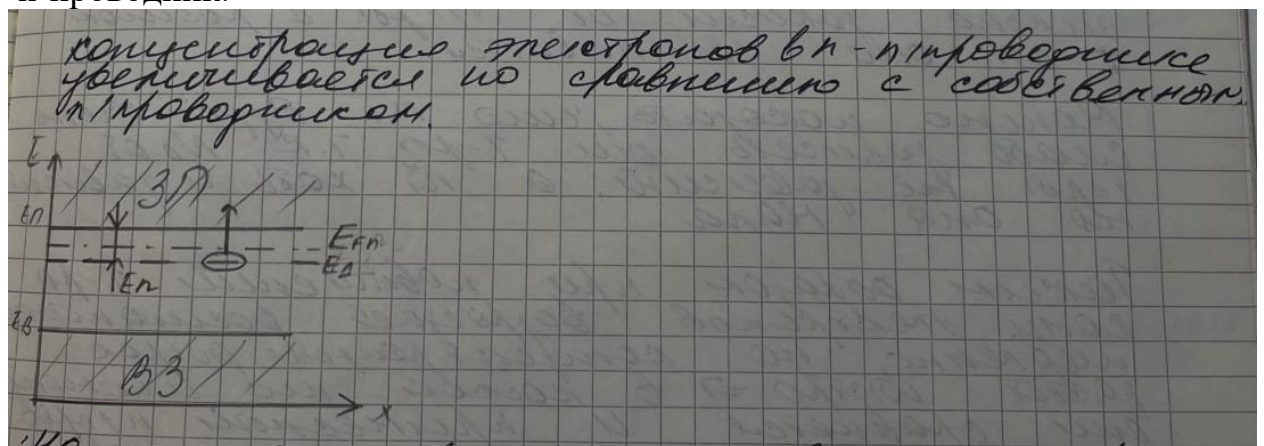
Вопрос 2

1. Нарисовать энергетические диаграммы собственного полупроводника, полупроводника n- и p-типа.

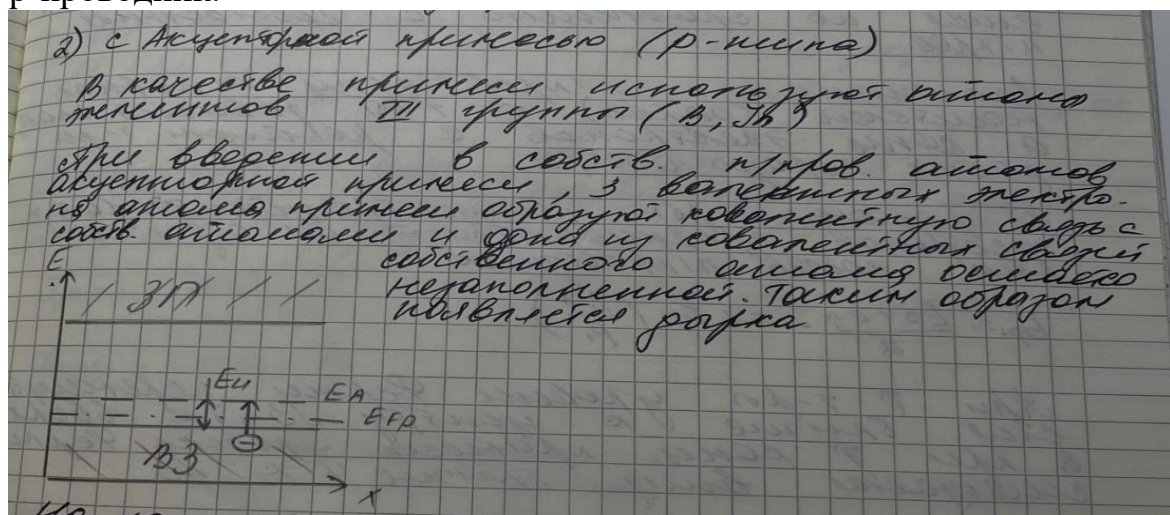
Собственный пп :



n-проводник:

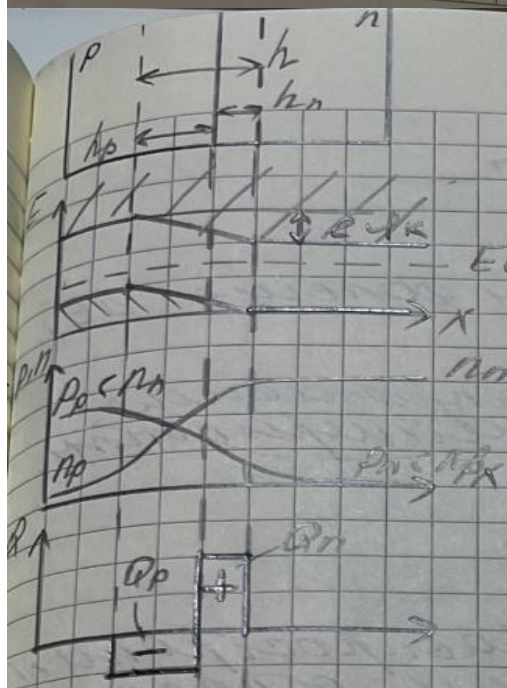
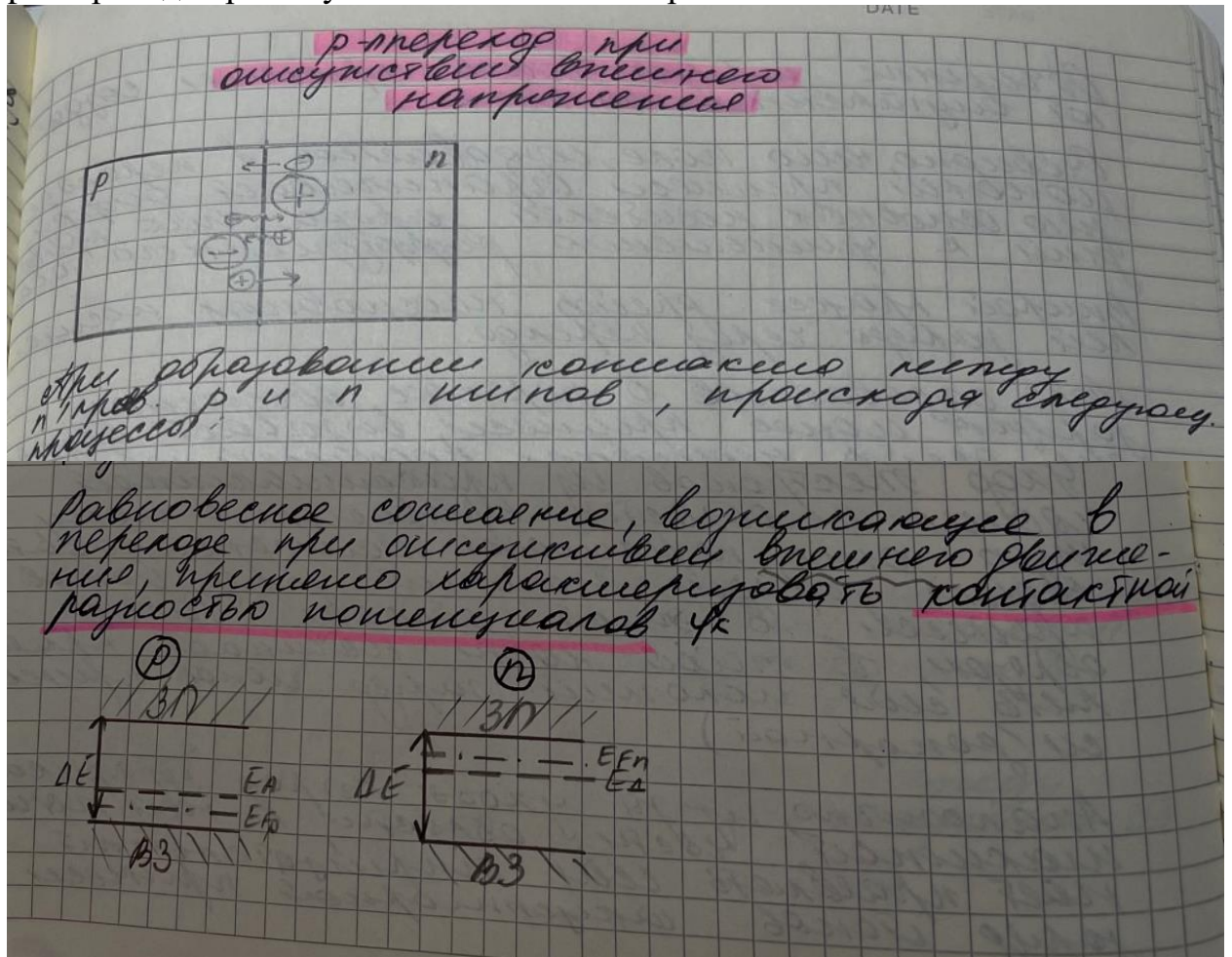


p-проводник:

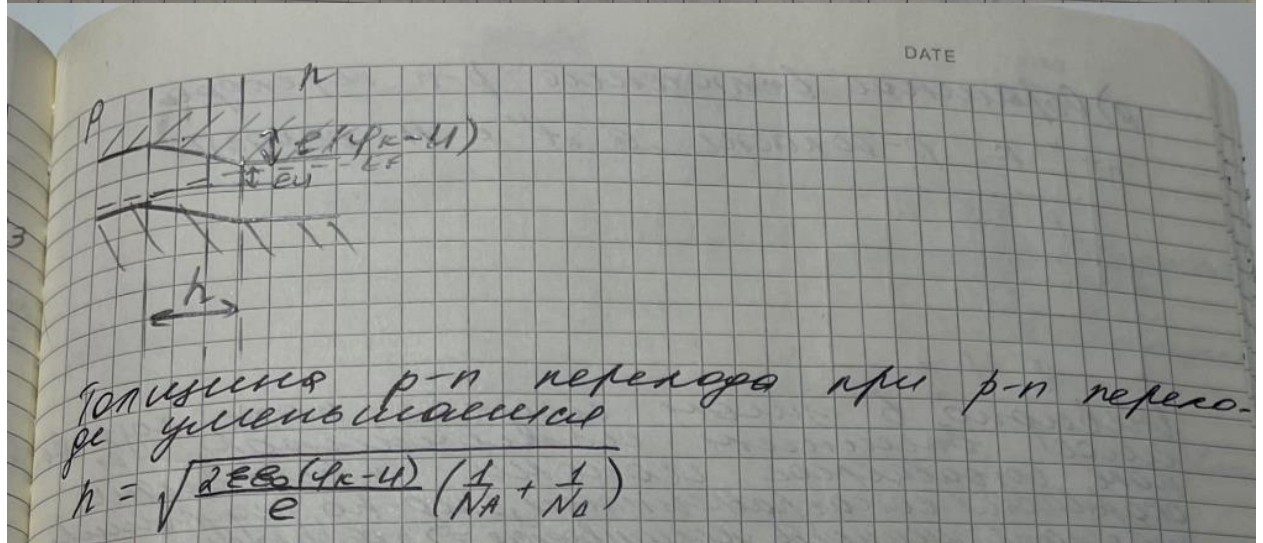
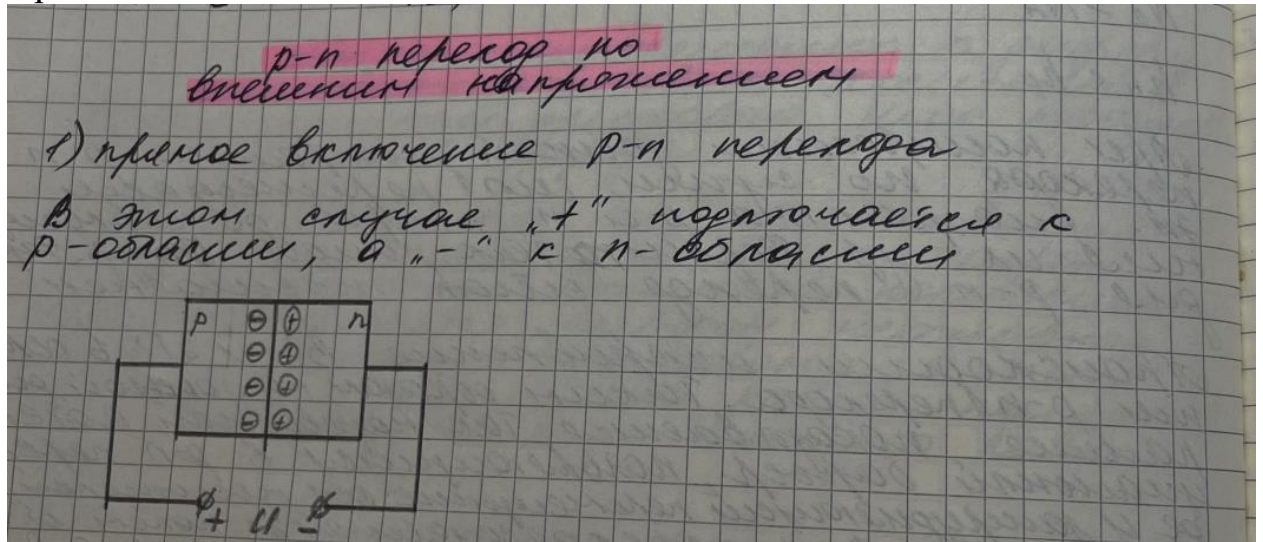


2. Нарисовать энергетические диаграммы рп-перехода при отсутствии внешнего напряжения, при прямом и при обратном включении.

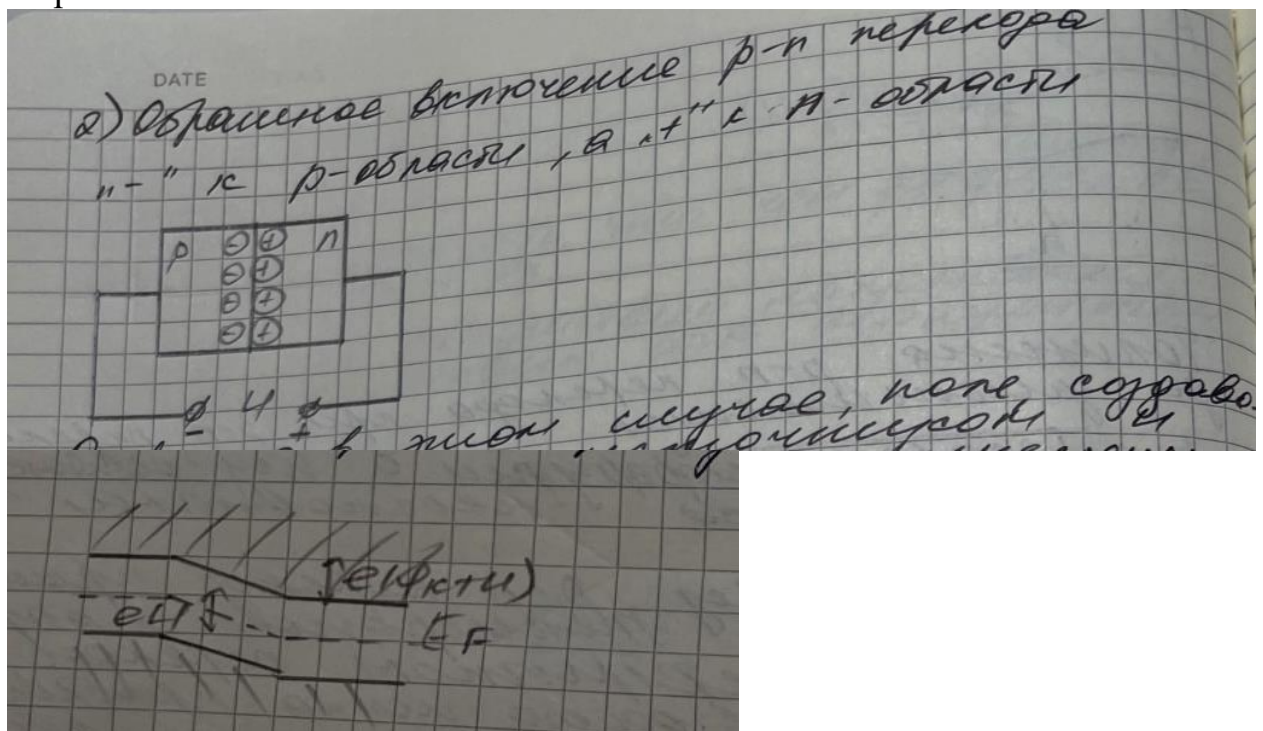
рп-перехода при отсутствии внешнего напряжения:



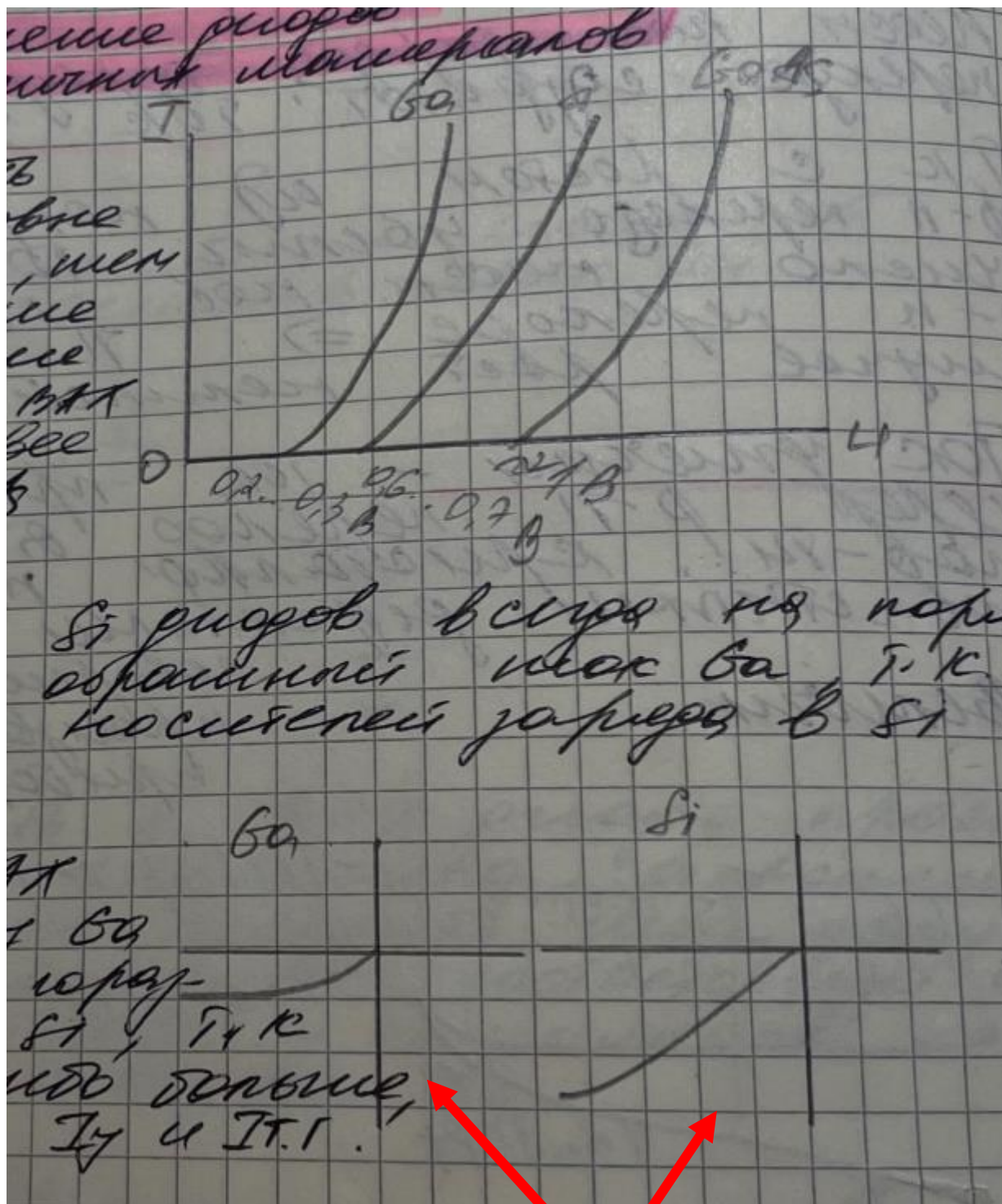
Прямое включение:



Обратное включение:

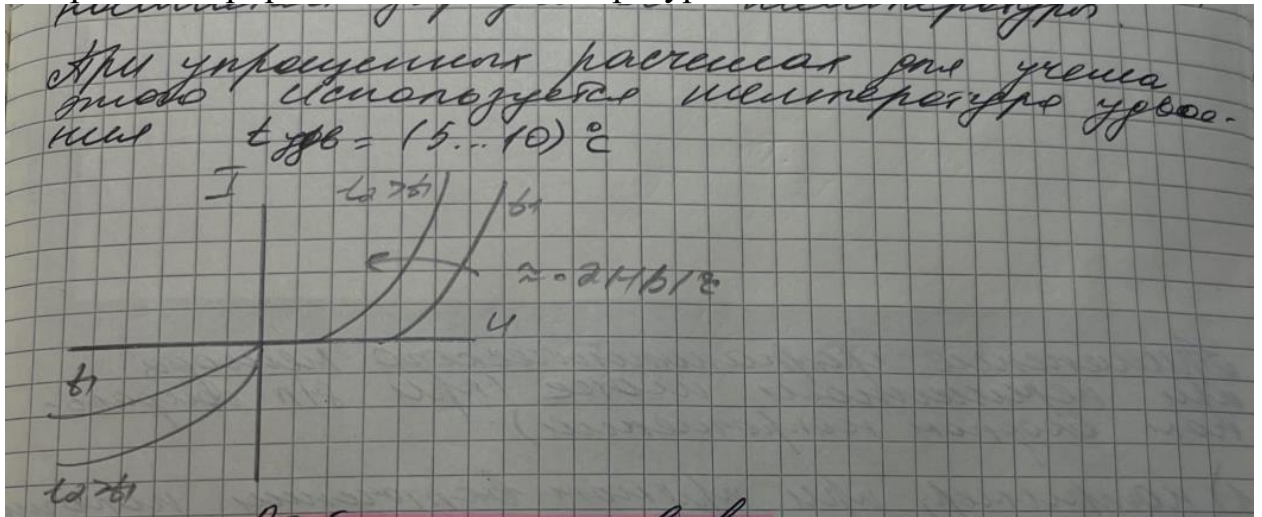


3. Нарисовать в одной системе координат ВАХ германиевого и кремниевых диодов.

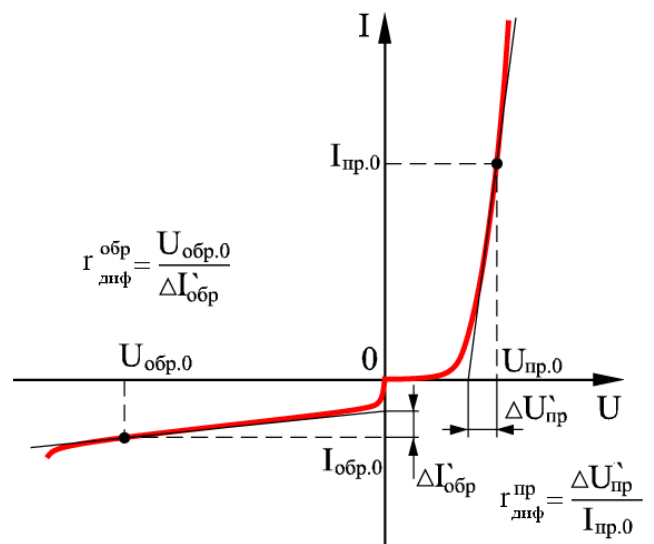
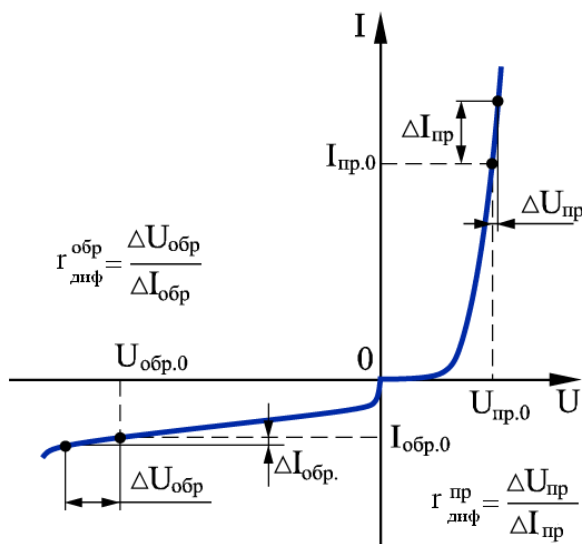


Обратная ВАХ

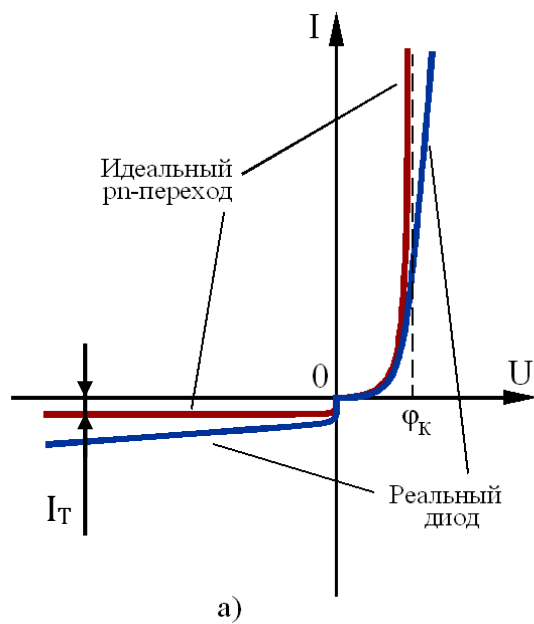
4. Проиллюстрировать влияние температуры на ВАХ диода.



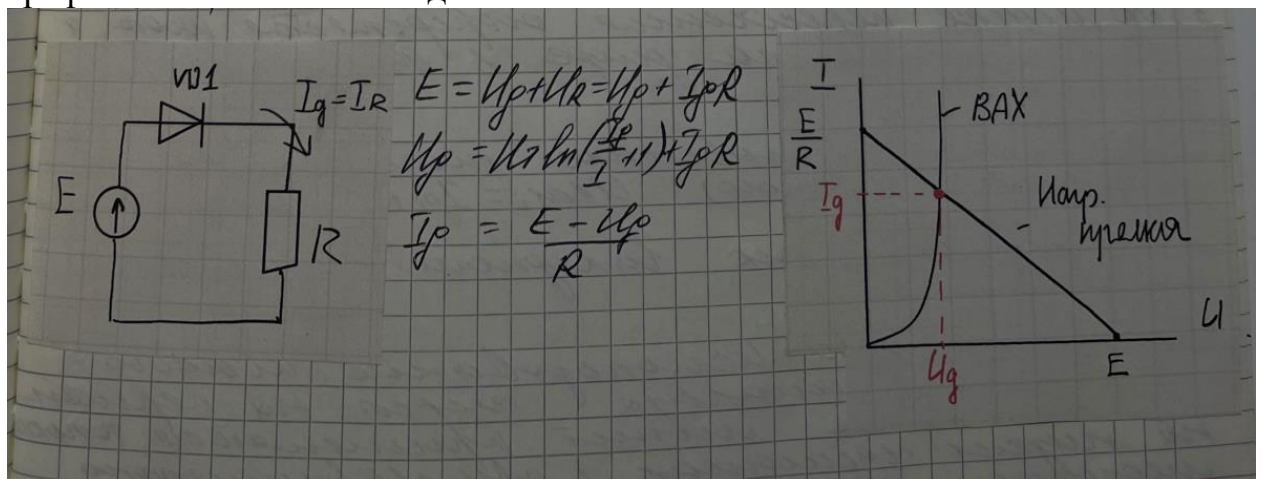
5. Показать на ВАХ способы определения дифференциального сопротивления диода в прямом и обратном включении.

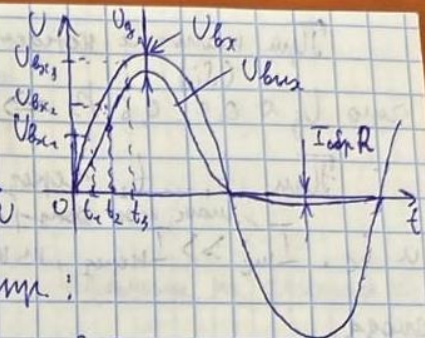
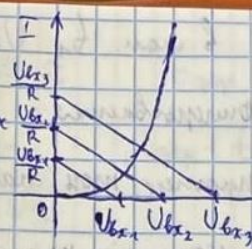
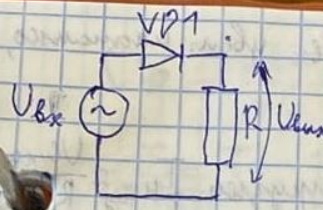
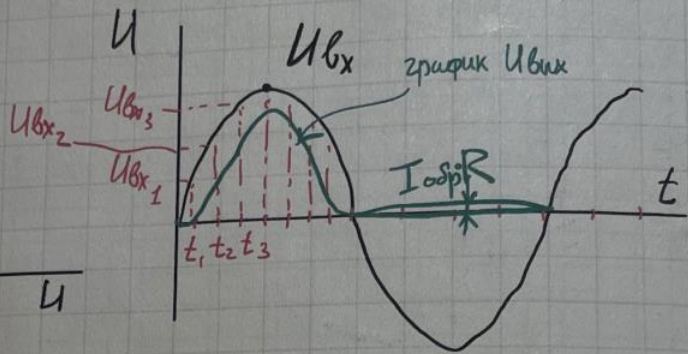
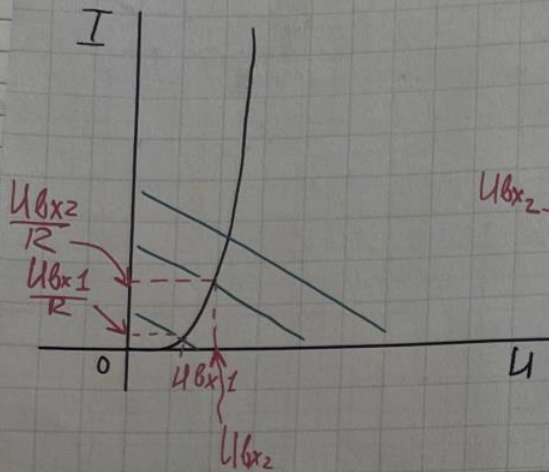
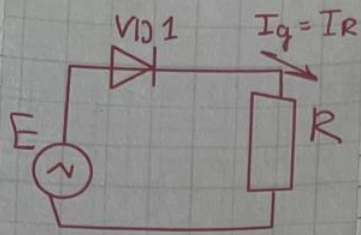


6. Нарисовать в одной системе координат ВАХ идеального рп-перехода и реального диода.



7. Проиллюстрировать определение режима работы диода в 1-полупериодной схеме без конденсатора при постоянном входном напряжении графоаналитическим методом.





Граф-аналит. метод при перем. напр.:

- 1). При перем. напр. поочередно найдем разбив на положит. и отриц. полупериодов. Для задан. м.о. моментов t_i строим нагрузочную прямую в одной с.и. с ВДХ.
- 2). По точке пересек. с ВДХ опред. миним. знак U_{di} и I_{di} .
- 3). Опред. $U_{bxi} = I_{di} R$ или $U_{bxi} = U_{bx} - U_{di}$.
- 4). Строим по точкам $U_{bxi}(t)$.

Отметим, что использ. граф-аналит. метод можно применять только при низких частотах, либо при сравнит. медленно меняющемся напр. и токах.

8. Нарисовать ВАХ стабилитрона. Показать на ВАХ способы определения дифференциального сопротивления.

Способы определения дифференциального сопротивления диода по ВАХ показаны на рис. 8.

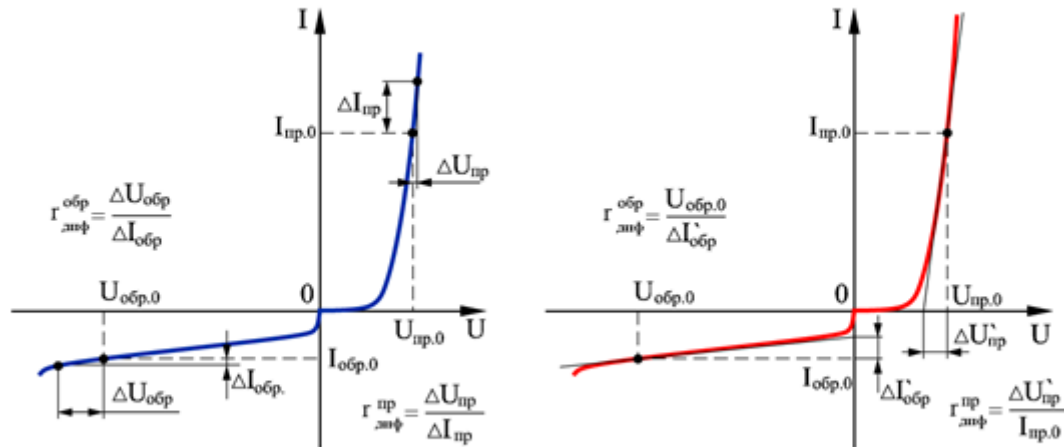
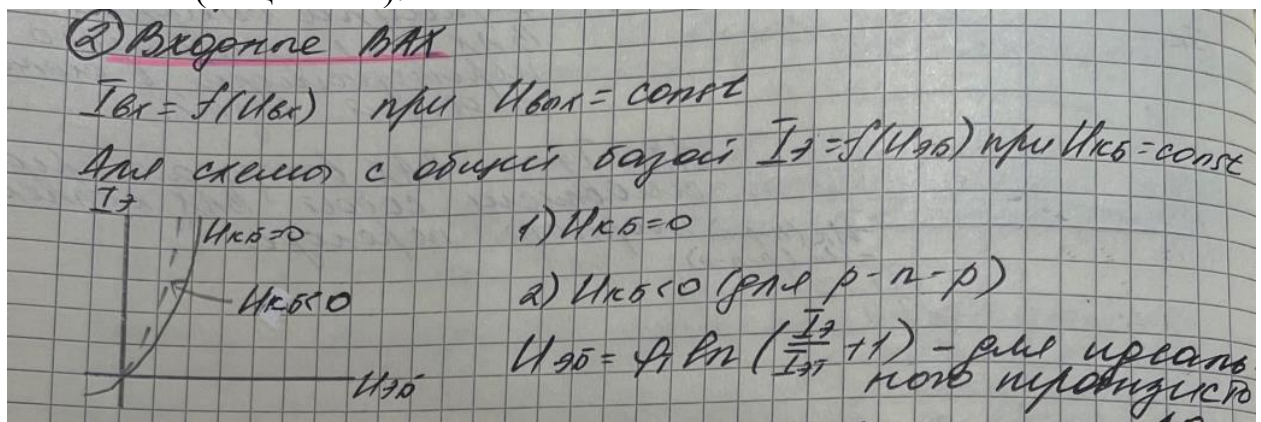


Рис. 8. Определение дифференциального сопротивления диода по ВАХ

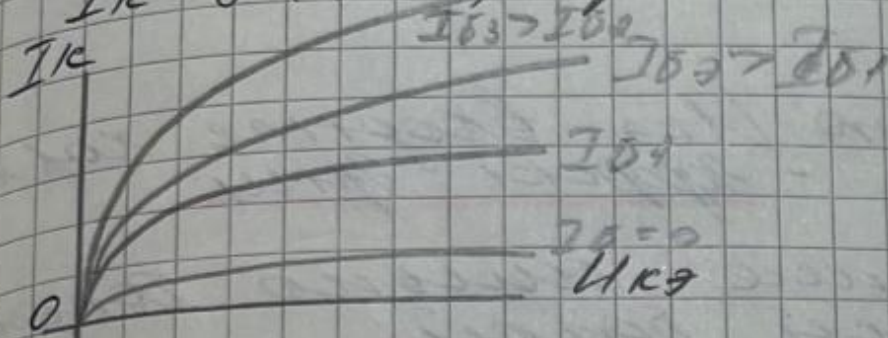
9. Нарисовать семейство входных и выходных ВАХ биполярного транзистора в схеме ОБ (общая база).



10. Нарисовать семейство входных и выходных ВАХ биполярного транзистора в схеме ОЭ.

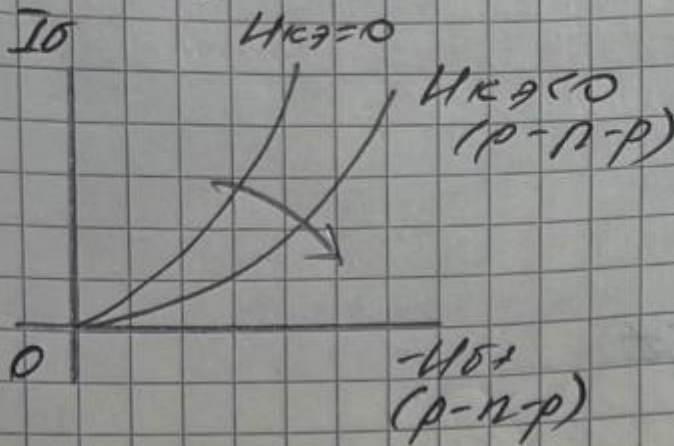
① Входные ВАХ

$I_{КЭ} = f(U_{КЭ})$ при $I_D = \text{const}$

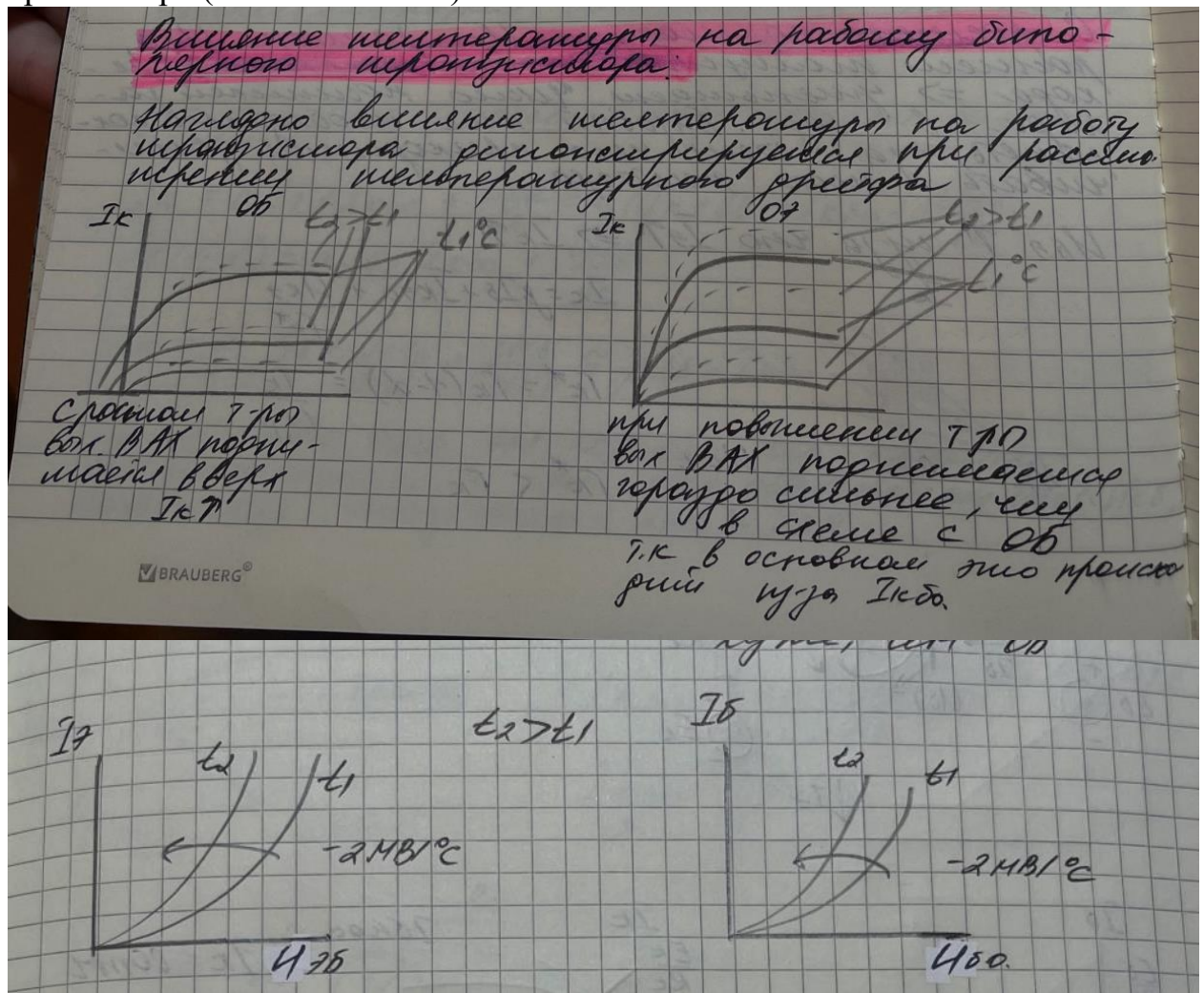


DATE

② Входные ВАХ



11. Проиллюстрировать влияние температуры на ВАХ биполярного транзистора (схемы ОЭ и ОБ).



12. Проиллюстрировать определение режима работы биполярного транзистора в схеме ОЭ при постоянном входном напряжении графоаналитическим методом.

Усл. св-ва по току в схеме с ОЭ

$$I_k \approx \beta I_\delta$$

$$I_k = \alpha I_\delta + I_{k0} + \frac{U_{k0}}{r_k} = \alpha (I_k + I_\delta) + I_{k0} + \frac{U_{k0}}{r_k}$$

$$I_k (1 - \alpha) = \alpha I_\delta + I_{k0} + \frac{U_{k0}}{r_k}$$

14. Смысл параметра h_{11} . Определение h_{11} по ВАХ.

h_{11} - вх. диф. сопр. транз. при КЗ по перем. току в вых. цепи

$$h_{11} = \frac{\partial i_{ex}}{\partial v_{ex}} \bigg|_{\substack{u_{ex} = 0 \\ (i_{ex} = \text{const})}}$$

15. Смысл параметра h_{12} . Определение h_{12} по ВАХ.

$h_{12} = \frac{\partial v_{ex}}{\partial i_{ex}} \bigg|_{\substack{u_{ex} = 0 \\ (i_{ex} = \text{const})}}$ - коэф-т обратной связи по напряжению при условии х.х. по перем. току во входн. цепи

16. Смысл параметра h_{21} . Определение h_{21} по ВАХ.

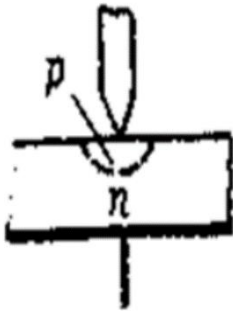
$h_{21} = \frac{\partial i_{ex}}{\partial i_{ex}} \bigg|_{\substack{u_{ex} = 0 \\ (i_{ex} = \text{const})}}$ - коэф-т передачи тока (дифференциальный) при условии КЗ по перем. току в вых. цепи

17. Смысл параметра h_{22} . Определение h_{22} по ВАХ.

$h_{22} = \frac{\partial v_{ex}}{\partial i_{ex}} \bigg|_{\substack{u_{ex} = 0 \\ (i_{ex} = \text{const})}}$ - дифференц. вых. проводимость транз. при условии х.х. по перем. току во вх. цепи

Вопрос 3

1. Нарисовать структуру точечного диода, дать краткие пояснения.



Тонкая заостренная проволочка (игла) с нанесенной на нее примесью приваривается при помощи импульса тока к пластинке полупроводника с определенным типом электропроводности. При этом из иглы в основной полупроводник диффундируют примеси, которые создают область с другим типом электропроводности. Этот процесс называется формовкой диода .

Таким образом, около иглы образуется миниатюрный n-p-переход полусферической формы.

“Дальше наверное не обязательно писать”

Германиевые точечные диоды обычно изготавливаются из германия n-типа со сравнительно большим удельным сопротивлением. К пластинке германия приваривают проволочку из вольфрама, покрытого индием. Индий является для германия акцептором. Полученная область германия p-типа работает в качестве эмиттера. Для изготовления кремниевых точечных диодов используются кремний n-типа и игла, покрытая алюминием, который служит акцептором для кремния.

2. Нарисовать структуру сплавного диода, дать краткие пояснения.

При изготовлении **сплавных диодов** происходит сплавление примеси в кремний или в другой п/п.

Электронно-дырочные переходы сплавных диодов-**резкие**.

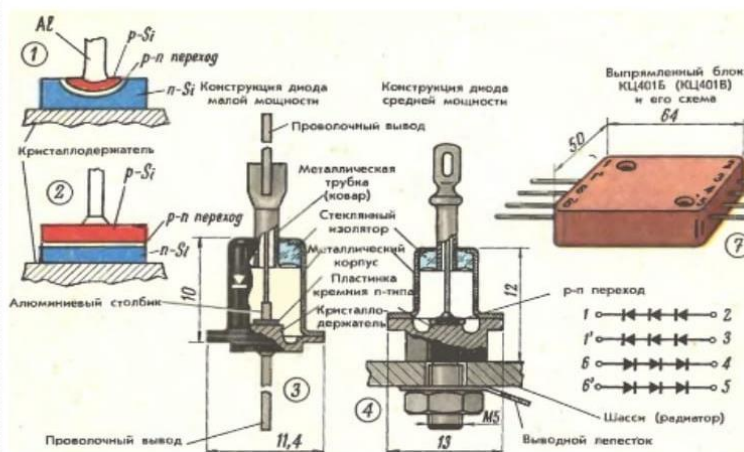


Рис. 6.2 Сплавной диод, строение и конструкция

Сплавной диод малой мощности — диод со средним значением выпрямленного тока не более 0,3 а. В середину пластинки кремния (Si) проводимостью n-типа (рис. 6.2.1) сплавлен цилиндрический столбик из алюминия (Al). Атомы алюминия диффундирует (проникает) в пластинку, вследствие чего проводимость части объема пластинки вблизи столбика становится дырочной (p-типа). Между нею и остальным объемом пластинки образуется p-n переход с хорошей проводимостью от алюминия к кремнию.



3. Нарисовать структуру диффузионного диода, дать краткие пояснения.

Диффузионный диод

Конструкции **сплавных и диффузионных диодов** аналогичны.

При изготовлении **диффузионных диодов** р-п переход создается при высокой температуре диффузией примеси в кремний или германий из среды, содержащей **пары примесного материала**.

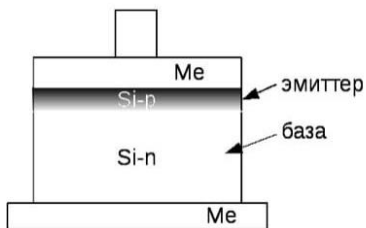


Рис. 6.3 Диффузионный диод

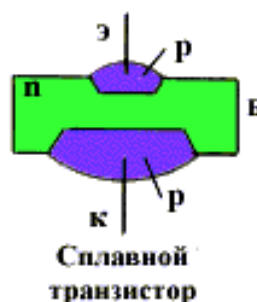
Диффузионный плоскостной р-п переход изготавливается на основе **кремния n-типа** или **германия p-типа**.

Диффузантами в первом случае является бор (В), а во втором - сурьма (Sb). Диффузия осуществляется при нагреве в водородной печи.

Пластина Si нагревается до температуры, близкой к температуре плавления, а таблетка бора до испарения. В условиях атомы бора (В) напыляются на поверхность пластины и диффундируют.

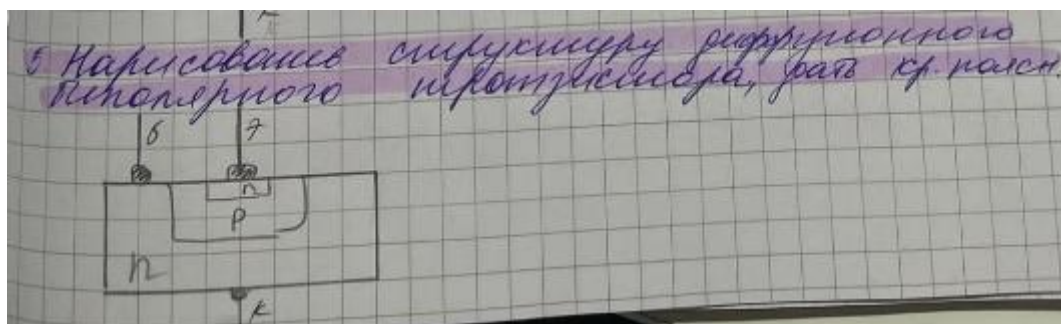


4. Нарисовать структуру сплавного биполярного транзистора, дать краткие пояснения.

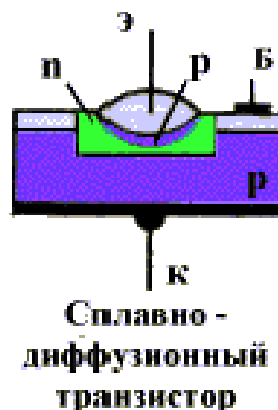


Сплавные транзисторы (преимущественно германиевые) изготавливают по сплавной технологии получения р-п-переходов. В мощных транзисторах электронно-дырочные переходы выполняют большой площади, вывод коллектора соединяется с корпусом. Основание корпуса для лучшего охлаждения изготавливают в виде массивной медной пластины, которую монтируют на теплоотводе или на шасси электронной схемы. Недостатки сплавных транзисторов - сравнительно невысокая предельная частота f_a 20 МГц, значительный разброс параметров и некоторая нестабильность свойств транзистора во времени.

5. Нарисовать структуру диффузионного биполярного транзистора, дать краткие пояснения.



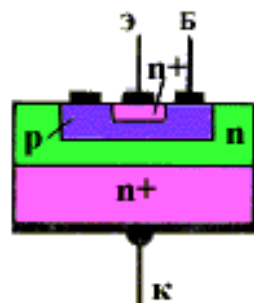
6. Нарисовать структуру диффузионно-сплавного биполярного транзистора, дать краткие пояснения



Сплавно-диффузионные транзисторы изготавливают сочетанием сплавной технологии с диффузионной. В этом случае наплавляемая навеска содержит как донорные (сурьма), так и акцепторные (индий) примеси. Навески размещают на исходной полупроводниковой пластине и прогревают. При сплавлении образуется эмиттерный переход. Однако при высокой температуре одновременно с процессом плавления происходит диффузия примесей из расплава в глубь кристалла. Примеси доноров и акцепторов распределяются по толщине кристалла при этом неравномерно, так как разные примеси диффундируют на разную глубину (например, диффузия сурьмы идет

скорее, чем индия). В кристаллах в результате образуется диффузионный базовый слой n-типа с неравномерным распределением примесей (получается «встроенное» в базу электрическое поле). Коллектором служит исходная пластинка германия p-типа. Перенос неосновных носителей через базовую область осуществляется в основном дрейфом во «встроенном» электрическом поле, поэтому транзисторы называют дрейфовыми. Толщина базы транзисторов может быть уменьшена до 0,5-1 мкм. Рабочие частоты достигают 500-1000 МГц. Широкий диапазон частот является основным достоинством этой разновидности транзисторов. К недостаткам относятся низкие обратные напряжения на эмиттере из-за сильного легирования эмиттерной области, а также трудности в разработке транзисторов на высокие напряжения и большие мощности. В последние годы при изготовлении дрейфовых транзисторов широко используется метод двойной диффузии. В этом случае базовая и эмиттерная области получают при диффузии примесей p- и n-типа в исходную пластинку полупроводника. Такие транзисторы изготавливают в виде планарных структур и меза-структур.

7. Нарисовать структуру эпитаксиально-планарного биполярного транзистора, дать краткие пояснения.



Эпитаксиально-
планарный
транзистор

29

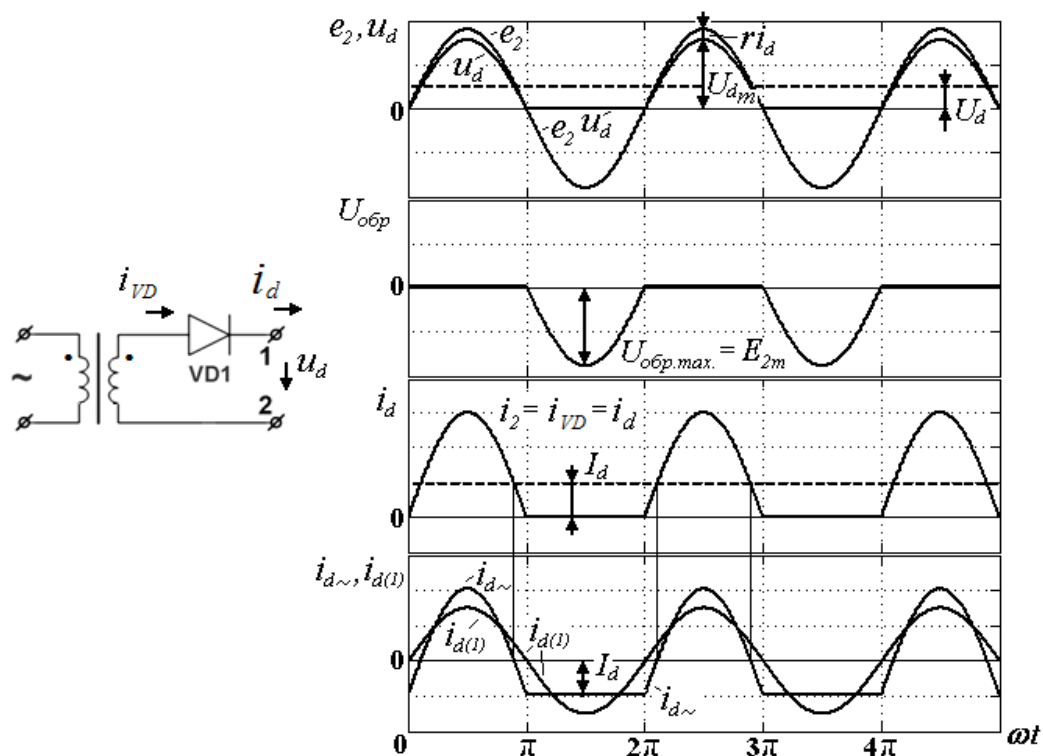
Эпитаксиально-планарные транзисторы имеют коллектор, состоящий из двух слоев: высокоомного, примыкающего к базе, и низкоомного, примыкающего к контакту. Высокоомный слой в транзисторах n-p-n получают методом эпитаксиального наращивания пленки монокристаллического полупроводника (в данном случае – с электронной проводимостью) на низкоомную подложку, образующую коллекторную область n+. В транзисторах p-n-p эпитаксиальный высокоомный слой имеет проводимость p-типа. Таким образом, между базой и низкоомным коллектором получается слой с высоким сопротивлением. Базовую и эмиттерную области изготавливают методом двойной диффузии через окна в пленке SiO₂. В результате получают дрейфовый транзистор типа n⁺-p-n-n⁺ или p⁺-p-p-p⁺, имеющий малое объемное сопротивление эпитаксиального коллектора, небольшую барьерную емкость C_к, небольшое время накопления носителей в

коллекторной области и, в то же время, достаточно высокое напряжение пробоя коллекторного перехода.

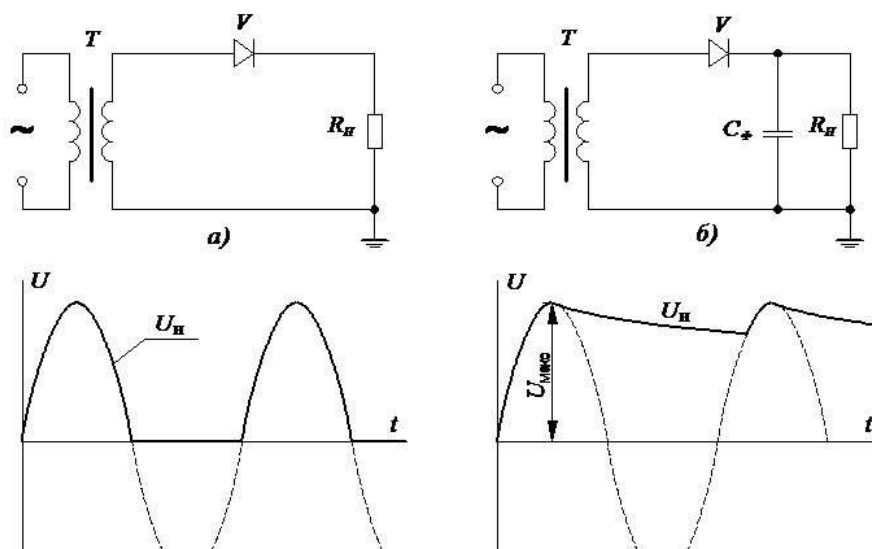
8. Нарисовать упрощенную структуру МОП-транзистора с индуцированным каналом.

9. Нарисовать упрощенную структуру МОП-транзистора со встроенным каналом.

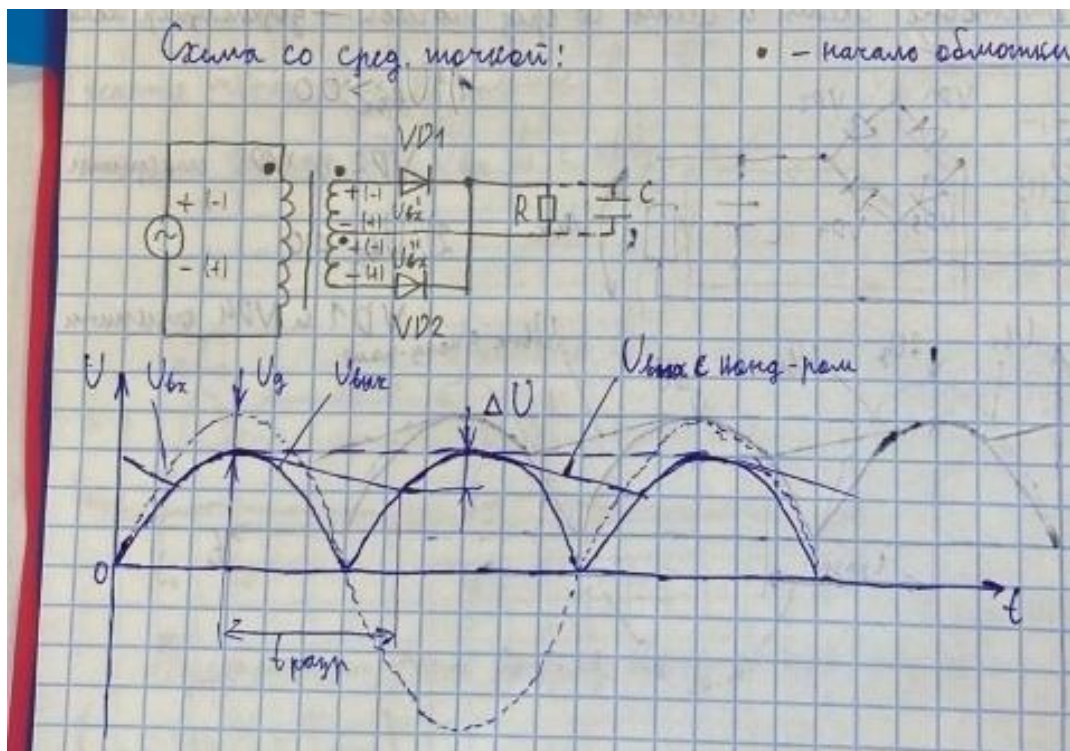
10. Нарисовать схемы снятия прямой и обратной ветвей ВАХ полупроводникового диода



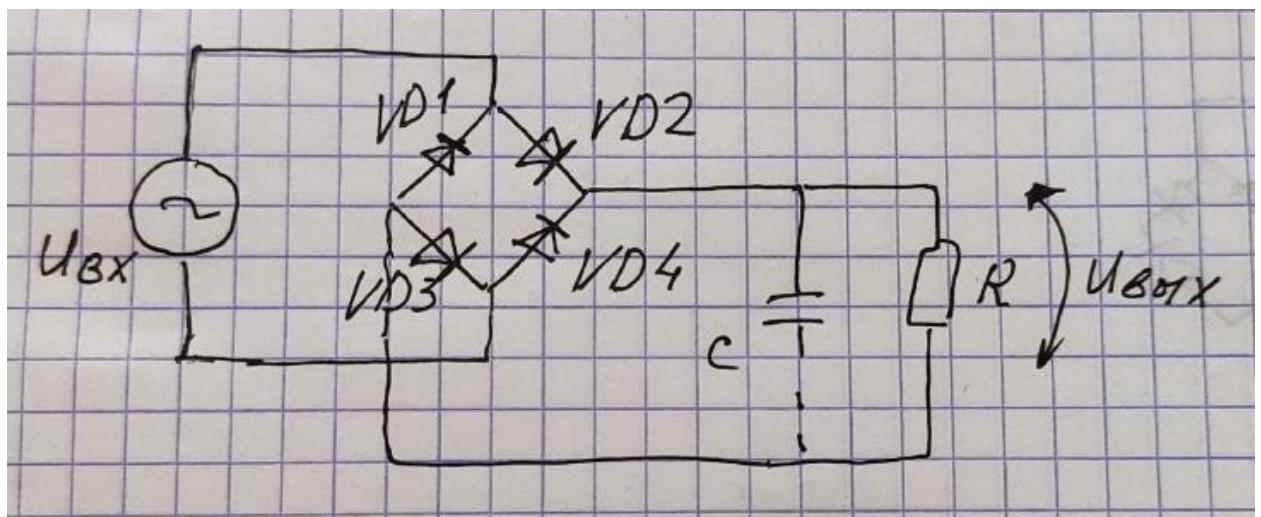
11. Нарисовать схему 1-полупериодного выпрямителя на диоде и временные диаграммы ее работы на низкой частоте (при наличии и при отсутствии конденсатора) и повышенной частоте (при отсутствии конденсатора).

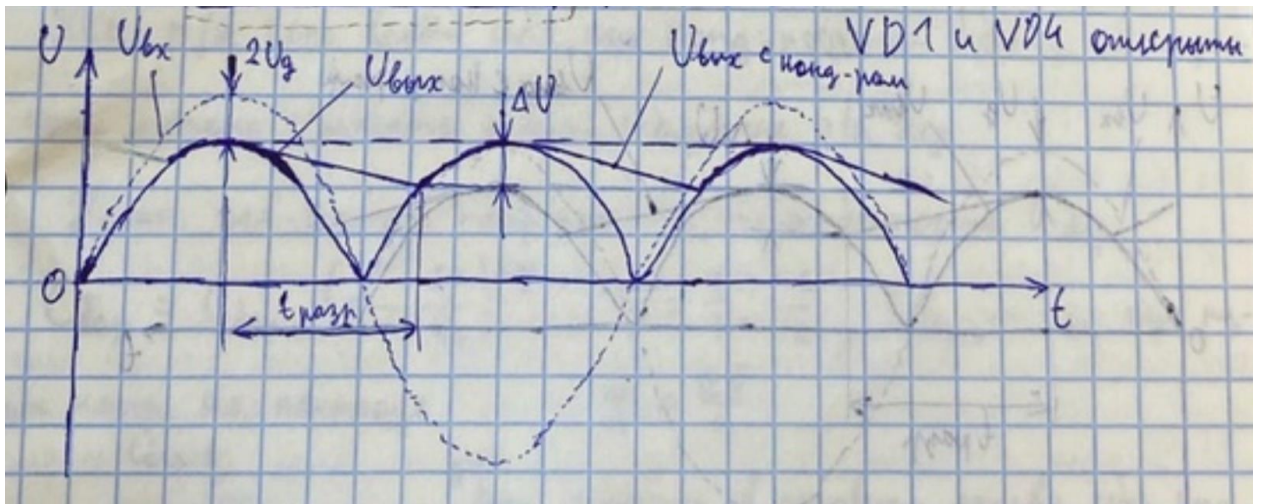


12. Нарисовать схему 2-полупериодного выпрямителя со средней точкой и временные диаграммы ее работы (при наличии и при отсутствии конденсатора).



13. Нарисовать мостовую схему выпрямителя и временные диаграммы ее работы (при наличии и при отсутствии конденсатора).





14. Нарисовать схему включения стабилитрона (простейший стабилизатор напряжения).

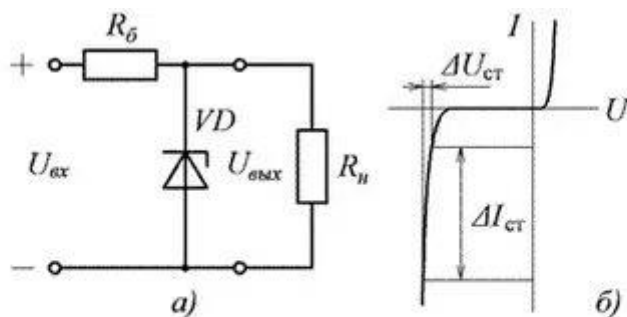
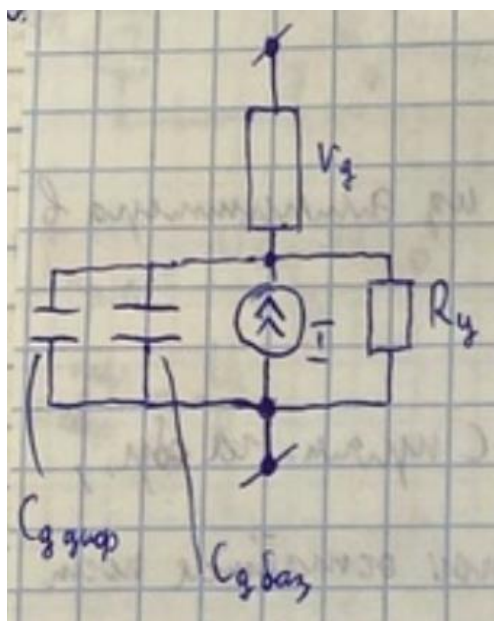


Рис. 7.15. Простейший параметрический стабилизатор напряжения (а);
вольтамперная характеристика полупроводникового стабилитрона (б)

Стабилитроном называют полупроводниковый (ПП) диод, у которого в области электрического пробоя ВАХ используется участок, где напряжение слабо зависит от обратного тока. Благодаря этому стабилитроны используют как стабилизаторы напряжения.

15. Нарисовать эквивалентную схему полупроводникового диода, кратко описать элементы. (? хз не уверена)



R_{π} — нелинейное сопротивление р-п перехода

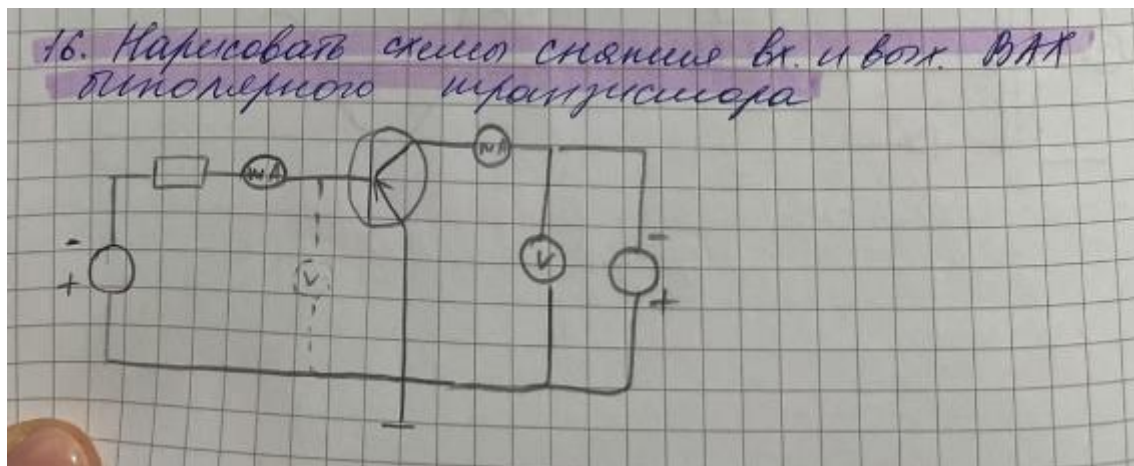
Сбар-Барьерная емкость характеризует связь между изменением объемного заряда примеси на переходе и изменением напряжения на переходе

Сдиф-Диффузионная емкость связывает между собой изменение напряжения на переходе и изменение заряда вблизи р-п перехода, вследствие инжекции носителя заряда.

Эти емкости определяют длительность переходных процессов.

I-генератор дополнительного тока неосновных носителей

16. Нарисовать схемы снятия выходных и входных ВАХ биполярного транзистора.



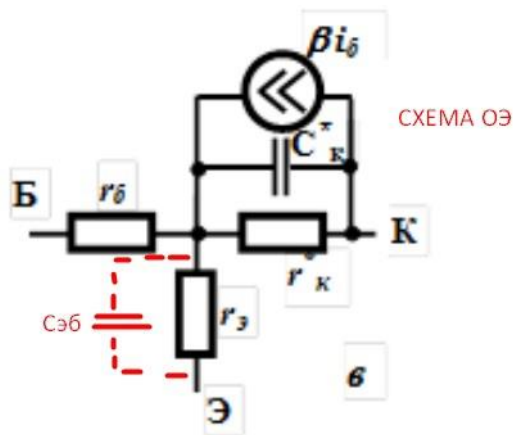
17. Нарисовать нелинейную эквивалентную схему биполярного транзистора, кратко описать элементы.



18. Нарисовать формальную эквивалентную схему биполярного транзистора (схема ОЭ), кратко описать элементы.



19. Нарисовать Т-образную физическую эквивалентную схему биполярного транзистора (схема ОЭ), кратко описать элементы (аналогичный вопрос – по физической схеме для включения с ОБ).



В этой схеме обозначено:

- $r_{\text{э}}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода включенного в прямом направлении. Обычно составляет несколько десятков Ом.
- $r_{\text{к}}$ - дифференциальное сопротивление коллекторного перехода, включенного в обратном направлении. Обычно составляет несколько сотен кОм.
- $r_{\text{б}}$ - объемное сопротивление базовой области. База выполняется с минимальной примесью, поэтому её сопротивление составляет порядка нескольких сотен Ом.
- β - дифференциальный коэффициент передачи по току при схеме включения с ОЭ
- $C_{\text{э}}$ - емкость эмиттерного перехода, носит диффузионный характер, часто влияние этой емкости не учитывают даже на сравнительно высоких частотах, т.к. она шунтирована малым сопротивлением $r_{\text{э}}$.
- $C_{\text{к}}$ - емкость коллекторного перехода является барьерной емкостью, она оказывает сильное влияние на частотные свойства транзисторов.

Физическая эквивалентная схема составляется для переменных токов и напряжений, но при условии, что эмиттерный переход находится под прямым напряжением, а коллекторный переход - под обратным напряжением, а амплитуды сигналов таковы, что транзистор работает в линейном режиме.

Широко применяется Т – образная эквивалентная схема, показанная на рисунке 2.10.

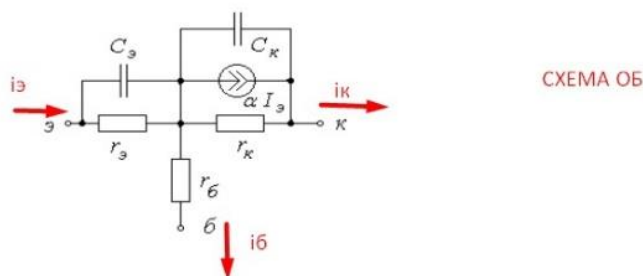


Рисунок 2.10 - Физическая эквивалентная схема биполярного транзистора

В этой схеме обозначено:

- $r_Э$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода включенного в прямом направлении. Обычно составляет несколько десятков Ом.
- $r_К$ - дифференциальное сопротивление коллекторного перехода, включенного в обратном направлении. Обычно составляет несколько сотен кОм.
- $r_Б$ - объемное сопротивление базовой области. База выполняется с минимальной примесью, поэтому её сопротивление составляет порядка нескольких сотен Ом.
- α - дифференциальный коэффициент передачи по току при схеме включения с ОБ.
- $C_Э$ - емкость эмиттерного перехода, носит диффузионный характер, часто влияние этой емкости не учитывают даже на сравнительно высоких частотах, т.к. она шунтирована малым сопротивлением $r_Э$.
- $C_К$ - емкость коллекторного перехода является барьерной емкостью, она оказывает сильное влияние на частотные свойства транзисторов.

19. Нарисовать схему задания статического режима биполярного транзистора с фиксированным базовым током, написать основные расчетные

5. Задание рабочей точки биполярного транзистора (БТ) в схеме с фиксированным током базы. Основные расчетные соотношения.

Схема с фиксированным током базы.

Режим по постоянному току задается с помощью резисторов $R_Б$, $R_К$ и источника питания $U_{ИП}$ (рис. 3.7). Уравнение для входной цепи согласно второму закону Кирхгофа имеет вид

$$U_{ИП} = I_Б \cdot R_Б + U_{БЭ},$$

где $U_{БЭ} \approx (0,6 \dots 0,8)$ В (напряжение на открытом эмиттерном переходе кремниевого БТ), т.е. $U_{БЭ} \ll U_{ИП}$, поэтому ток в цепи базы $I_Б \approx U_{ИП}/R_Б$ не зависит от параметров транзистора, а определяется параметрами входной цепи. Для выходной цепи уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$U_{ИП} = I_К \cdot R_К + U_{КЭ}.$$

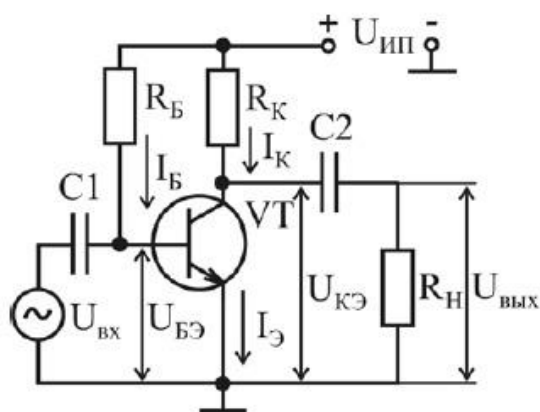


Рис. 3.7

Поскольку амплитуды входных и выходных токов и напряжений усилителя связаны соотношениями

$$U_{ВХ\text{ м}} = I_{Б\text{ м}} h_{11Э}, \quad \text{если} \quad R_Б \gg h_{11Э}, \quad \text{и}$$

$$U_{ВЫХ\text{ м}} = I_{К\text{ м}} R_К, \quad \text{если} \quad R_Н \gg R_К,$$

то коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{ВЫХ\text{ м}} / U_{ВХ\text{ м}} = I_{К\text{ м}} R_К / I_{Б\text{ м}} h_{11Э} = h_{21Э} R_К / h_{11Э},$$

а коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = \frac{U_{ВЫХ\text{ м}} I_{К\text{ м}}}{U_{ВХ\text{ м}} I_{Б\text{ м}}} = \frac{U_{ВЫХ\text{ м}}^2 h_{11Э}}{R_К U_{ВХ\text{ м}}^2} = \frac{I_{К\text{ м}}^2 R_К}{I_{Б\text{ м}}^2 h_{11Э}} = h_{21Э}^2 \frac{R_К}{h_{11Э}}.$$

20. Нарисовать схему ключа на биполярном транзисторе и временные диаграммы его работы (входное напряжение, ток коллектора, напряжение коллектор-эмиттер).

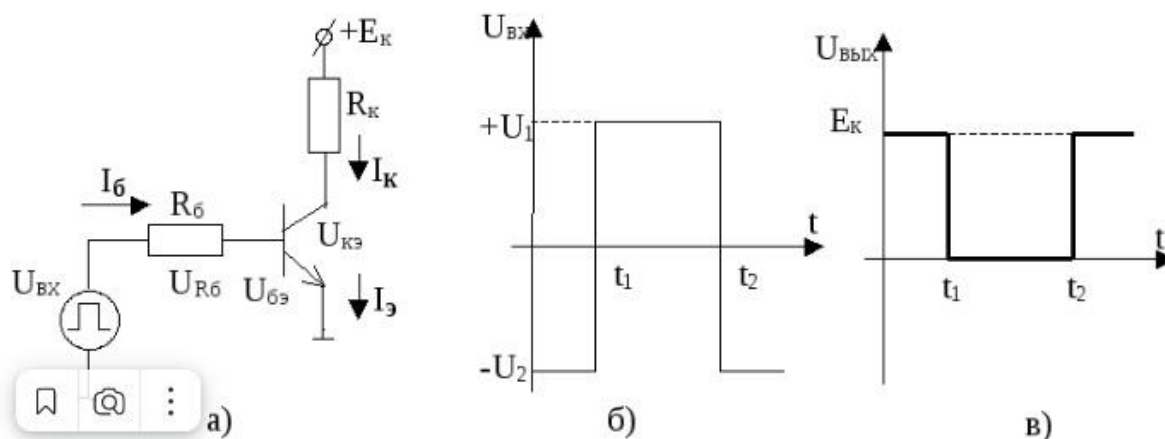


Рис.9.11. Схема простейшего ключа на биполярном транзисторе и диаграммы его работы

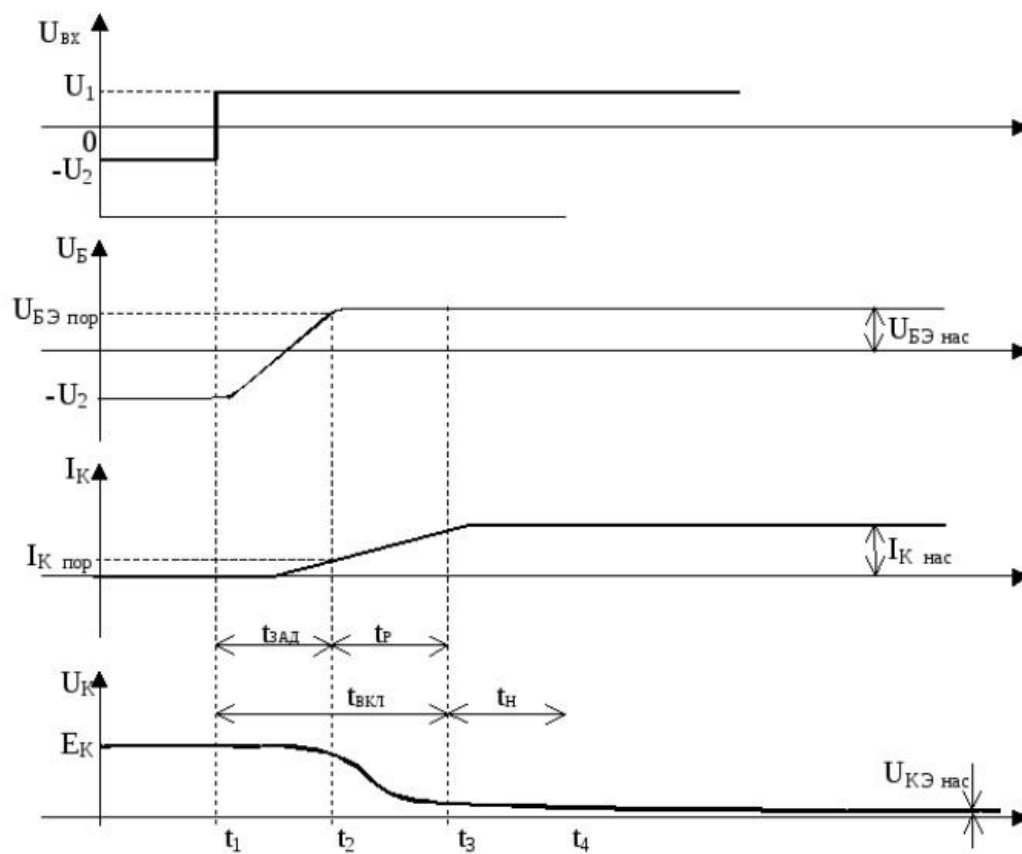


Рис.9.11. Временные диаграммы включения транзисторного ключа

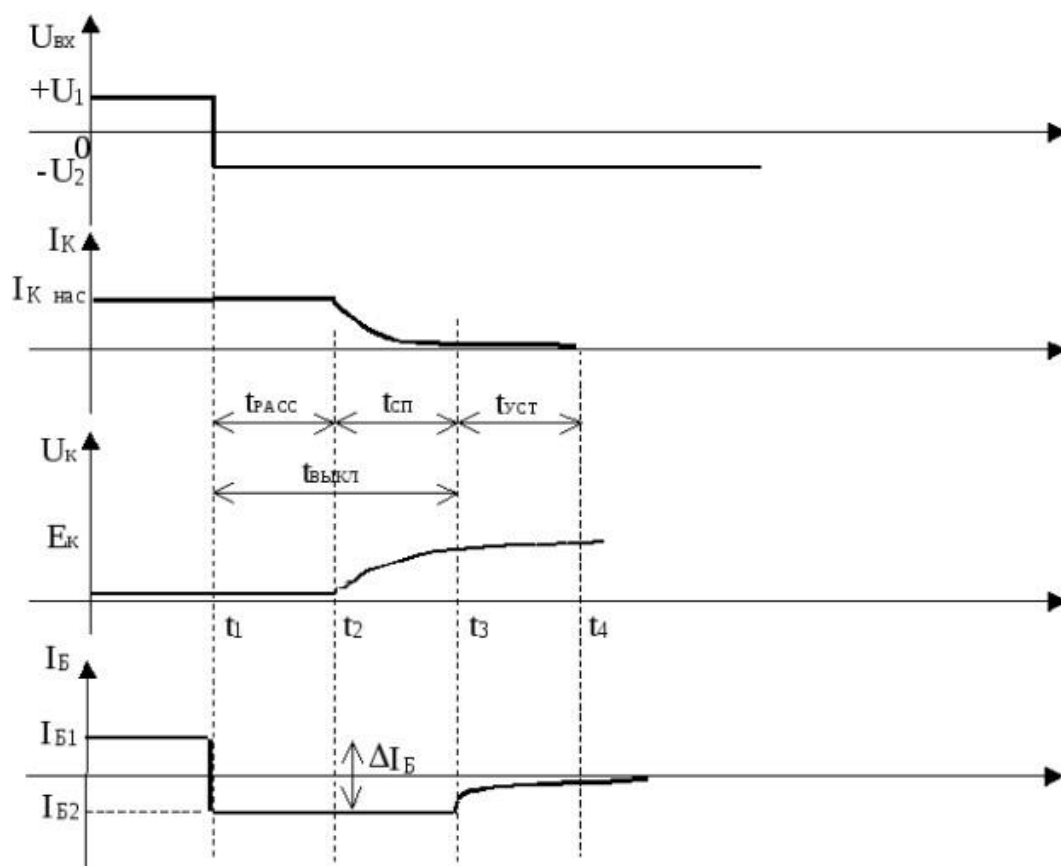


Рис.9.12. Временные диаграммы выключения транзисторного ключа

Вопрос 4

1. Дать краткие сведения о собственных полупроводниках (элементы зонной теории твердого тела, носители заряда, генерация и рекомбинация, зонная диаграмма).

Собственный полупроводник – это полупроводник без примесей или с концентрацией примеси настолько малой, что она не оказывает существенного влияния на удельную проводимость полупроводника.

Энергетические диаграммы собственного полупроводника приведены на рис. 4.1

При абсолютном нуле температуры валентная зона полностью заполнена электронами, а зона проводимости – пуста. При повышении температуры происходит *тепловая генерация* носителей заряда: часть электронов с верхних уровней валентной зоны могут быть переброшены в зону проводимости. Таким образом, в свободной зоне появляются свободные электроны, а в валентной зоне остаются вакантные места – дырки, они ведут себя во внешнем поле как частицы с положительным зарядом. Дырки являются положительными носителями заряда в полупроводниках. Во внешнем электрическом поле дырки движутся в сторону, противоположную электронам. Такого рода проводимость называется дырочной. Таким образом, у собственных полупроводников наблюдается двоякого рода проводимость: электронная и дырочная.

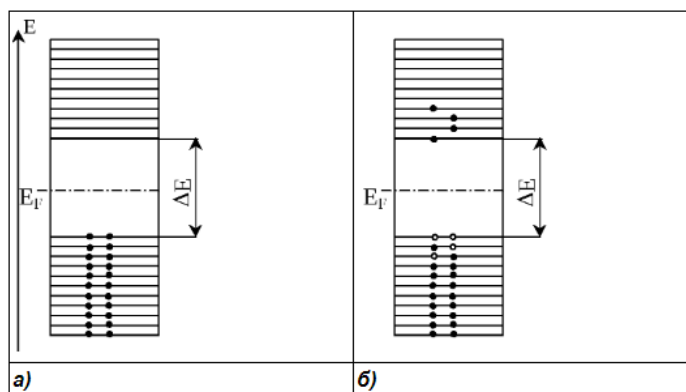


Рис. 4.1. Энергетические диаграммы собственного полупроводника: а) – при $T=0$; б) – при $T>0$

Процесс тепловой генерации возможен даже при очень низких температурах из-за значительных флуктуаций энергий тепловых колебаний атомов относительно узлов кристаллической решетки. Одновременно с генерацией носителей идет противоположный процесс, называемый *рекомбинацией*: возвращение электронов из зоны проводимости на вакантные места в валентной зоне, в результате чего исчезает пара носителей заряда (электрон и дырка). В собственном полупроводнике при каждой температуре устанавливается равновесие между процессами генерации и рекомбинации, при котором концентрации электронов и дырок одинаковы.

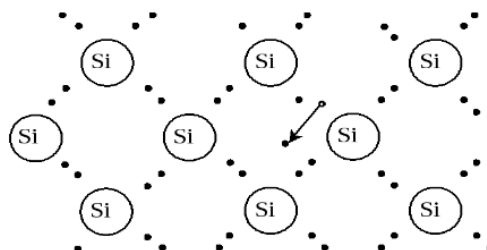
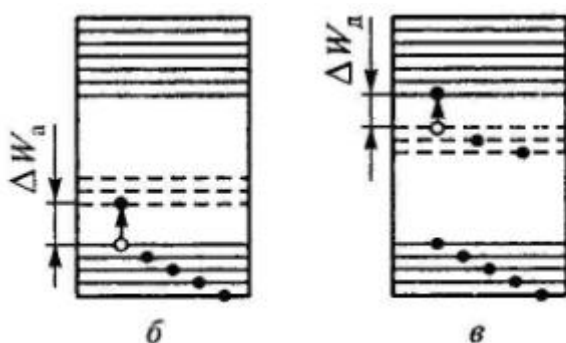


Рис. 4.2. Плоская модель решетки кремния

2. Дать краткие сведения о примесных полупроводниках (основные и неосновные носители заряда, зонные диаграммы).

В примесных полупроводниках атомы примеси либо поставляют электроны в ЗП полупроводника, либо принимают их с уровней ВЗ. Эти переходы электронов осуществляются при существенно меньших затратах энергии, которые требуются электронам для преодоления потенциального барьера в виде ЗЗ полупроводника. Поэтому эти виды переходов в примесных полупроводниках являются основными, доминирующими над переходом электронов из ВЗ в ЗП.

Атомы примеси, размещаясь в запрещенной зоне полупроводника, создают в пределах этой зоны дискретные энергетические уровни либо у нижнего ее края вблизи к ВЗ, либо — у верхнего, вблизи к ЗП (см. рис. б, в).



Виды примесей.

Примесь в зависимости от ее влияния на тип электропроводности полупроводникового материала различают: акцепторную, донорную, амфотерную.

Акцепторная примесь. Если энергетические уровни атомов примеси находятся в ЗЗ вблизи ВЗ, то при тепловом или световом воздействии на материал энергией, равной или большей ΔW_a (см. рис. б), но меньшей, чем ΔW ЗЗ, электроны из ВЗ полупроводника будут забрасываться на свободные уровни примеси (см. табл.), в результате чего в ВЗ образуются дырки. Ввиду разобщенности атомов примеси электроны, заброшенные на примесные уровни, не участвуют в электрическом токе. Поэтому концентрация дырок в ВЗ станет во много раз больше, чем концентрация электронов в ЗП. Электропроводность в данном случае будет *дырочная*, полупроводник *p-типа* (позитив — положительный), а примесь — *акцепторная* (акцептор — принимающий). В полупроводнике с электропроводностью p-типа дырки называют *основными носителями заряда*, а электроны — *неосновными носителями заряда*.

Донорная примесь. Если уровни примеси располагаются в ЗЗ у края ЗП полупроводника, то электроны с этих уровней будут переходить в ЗП при энергии, равной или большей ΔW_d (см. рис. в), но меньшей, чем ширина ΔW ЗЗ собственного полупроводника (см. табл.). Дырки, возникшие на энергетических уровнях примесных атомов, отданных друг от друга на значительные расстояния, остаются локализованными и не могут участвовать в электропроводности. Поэтому концентрация электронов в ЗП наблюдается во много раз больше, чем концентрация дырок в ВЗ полупроводника. В этом случае электропроводность будет *электронная*, полупроводник *n-типа* (негатив —

отрицательный), а примесь — *донорная* (донор — дающий). В полупроводнике с электропроводностью n-типа электроны считаются *основными носителями заряда*, а дырки — *неосновными носителями заряда*.

3. Дать описание видов тока в полупроводниках.

В полупроводниковых приборах могут протекать дрейфовый и диффузионный токи. *Дрейфовым* называется ток, обусловленный электрическим полем. Если к полупроводнику приложить внешнее электрическое поле, то в нем наблюдается направленное движение дырок вдоль поля и направленное движение электронов в противоположном направлении. Суммарный дрейфовый ток электронов и дырок определяется выражением

$$I_{др} = q_e S (\mu_n n + \mu_p p) E, \quad (1.2.)$$

где n и p — число электронов и дырок, пересекающих площадь в $1 \text{ см}^2/\text{с}$; S — площадь поперечного сечения полупроводника.

Диффузионный ток обусловлен перемещением носителей заряда из области с высокой концентрацией в область с более низкой концентрацией, т. е. обусловлен наличием градиента концентрации (dn/dx — градиент концентрации электронов; dp/dx — градиент концентрации дырок). Суммарный диффузионный ток электронов и дырок определяется соотношением

$$I_{диф} = q_e S D_n \frac{dn}{dx} - q_e S D_p \frac{dp}{dx}, \quad (1.3.)$$

где D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно.

Коэффициент диффузии равен числу носителей заряда, диффундирующих за одну секунду через единичную площадку при единичном градиенте концентрации. Знак «минус» в формуле означает, что диффузия происходит в направлении уменьшения концентрации, а так как дырки имеют положительный заряд, то диффузионный ток будет положительным при $dp/dx < 0$.

Коэффициенты диффузии зависят от типа полупроводника, концентрации примесей, температуры и состояния кристаллической решетки. Например, при комнатной температуре для германия $D_n \gg 100 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p \gg 47 \text{ см}^2/\text{с}$ для кремния $D_n \gg 30 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p \gg 13 \text{ см}^2/\text{с}$.

Коэффициент диффузии связан с подвижностью носителей заряда соотношением Эйнштейна:

Общий ток в полупроводнике может содержать четыре составляющие:

$$I_{общ} = I_{дрн} + I_{дрр} + I_{дифн} + I_{дифр}.$$

Концентрация носителей заряда в электронном объеме полупроводника может изменяться за счет генерации и

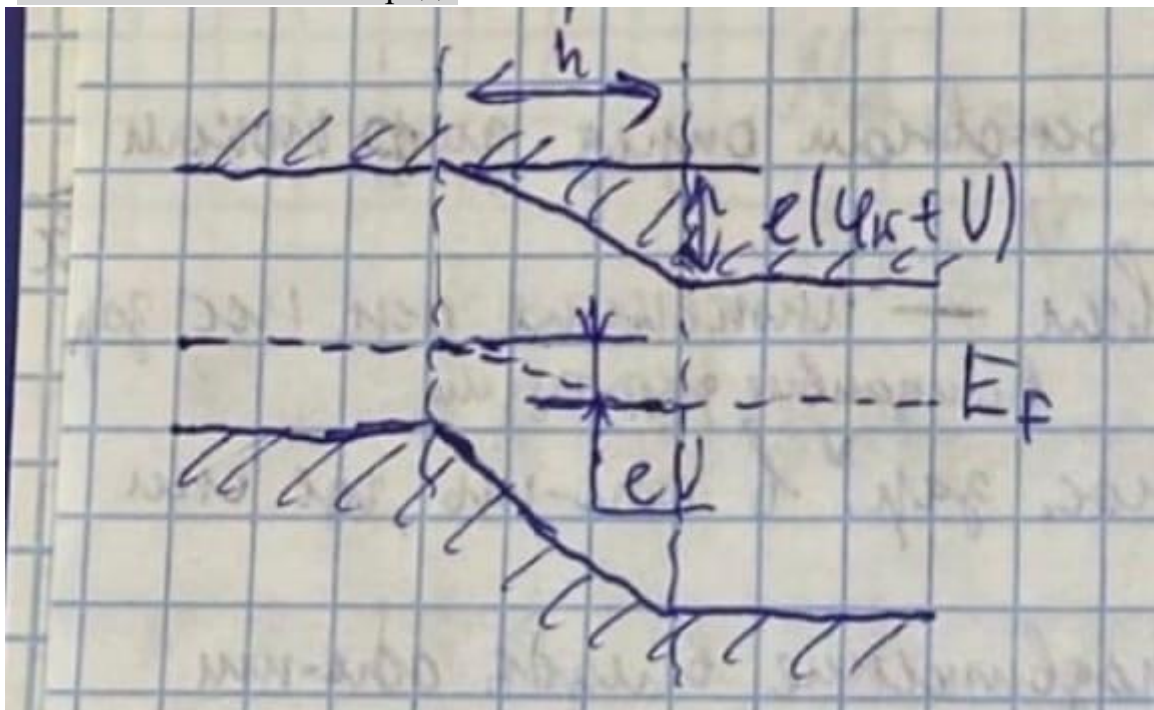
рекомбинации носителей, а также при возбуждении полупроводника (например, при освещении, действии внешнего электрического или магнитного поля). При возбуждении полупроводника концентрация подвижных носителей заряда — электронов (n) и дырок (p) — превышает равновесную концентрацию (n_0 и p_0). Это приводит к увеличению проводимости полупроводника. Электроны или дырки проводимости, не находящиеся в термодинамическом равновесии, называются неравновесными носителями заряда.

4. Дать описание процессов в рп-переходе при отсутствии внешнего напряжения.

При образовании контакта между полупроводниками p и n типов происходят следующие процессы: Диффузия основных носителей заряда через границу раздела p - n полупроводников. Происходит диффузия электронов из приграничной части n -области в пограничную часть p -области. Одновременно происходит диффузия дыр из p -обл в n -область. Ионы создают внутреннее электрическое поле. Также поле, создаваемого в переходе ионной примеси ограничивает диффузию носителей заряда, следовательно происходит уменьшение диффузионного тока.

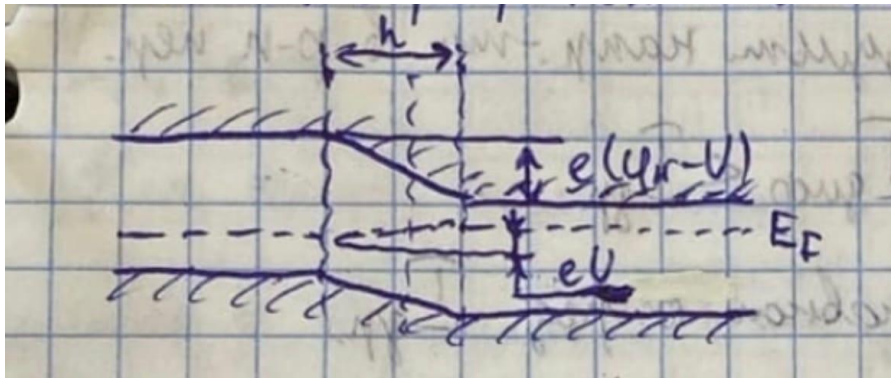
5. Дать описание процессов в рп-переходе при прямом включении.

Прямое включение p - n перехода к p -области, — к n -области. Электрическое поле создаваемое внешним источником противоположно полю, создаваемому Ионами примеси \rightarrow напряженность результирующего электрического поля уменьшается \rightarrow потенциальный барьер понижается. Толщина p - n перехода при прямом включении уменьшается. Идиф»Идр. Ток в основном определяется диффузионным током. Основной процесс — инжекция основных носителей заряда



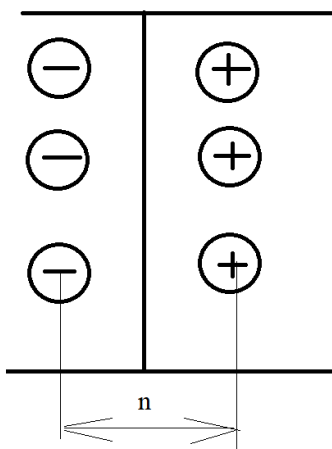
6. Дать описание процессов в рп-переходе при обратном включении.

Обратная включения р-п перехода
Поле внешнего источника и поле Ионов оказывается сонаправлены -> результат. напр. поля усил. -> потенциальный барьер для основных носителей заряда повышается -> $I_{\text{диф}}$ уменьшается. Увелич. результат. напр-ти в р-п переходе приводит к возрастанию $I_{\text{др}}$ -> $I_{\text{диф}} < I_{\text{др}}$. Результирующий отк в основном определяется $I_{\text{др}}$. Проявляется основное свойство р-п перехода - выпрямление электрического тока. Основной процесс Экстракция и основных носителей заряда



7. Барьерная и диффузионная ёмкости рп-перехода.

1. Барьерная емкость характеризует связь между изменением объемного заряда примеси на переходе и изменением напряжения на переходе.



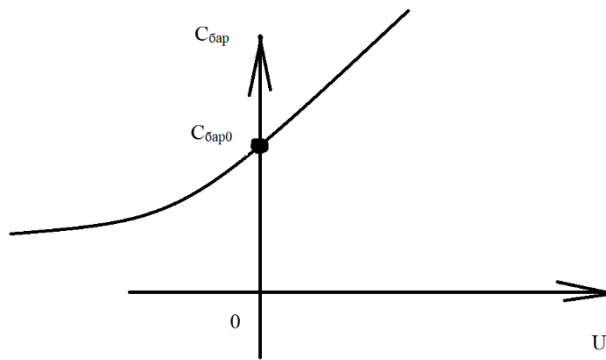
$$C_{\text{бар}} = (dQ_{\text{пер}})/dU$$

Т.о. р-п переход ведет себя как конденсатор, расстояние между обкладками которого можно считать равной толщине р-п перехода.

Нелинейная зависимость от напряжения – особенность $C_{\text{бар}}$

$$C_{\text{бар}} = C_{\text{бар}0}(1 - U/\phi_k)^{-\gamma} \quad \gamma - \text{гамма} = 1/3 \dots 1/2$$

, где $\phi_k = kT/e$



Барьерная емкость проявляет себя при обратном включении, т.к. при прямом зашунтирована малым сопротивлением р-п перехода. С увеличением напряжения

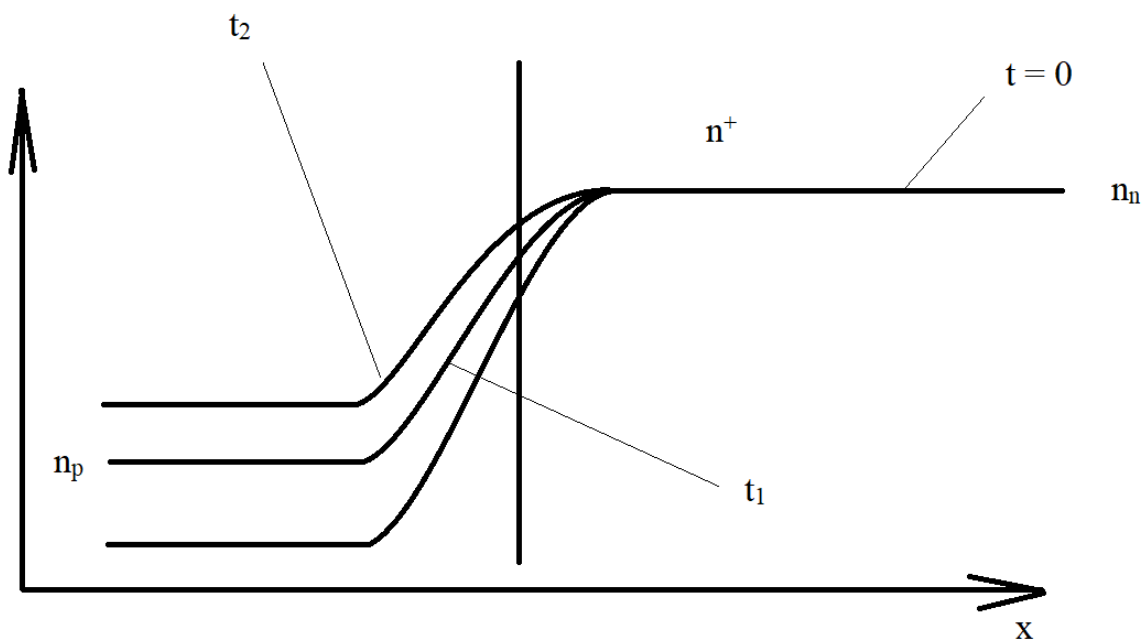
толщина р-п перехода также увеличивается (увеличивается расстояние между обкладками)

2. Диффузионная емкость связывает между собой изменение напряжения на переходе и изменение заряда вблизи р-п перехода, вследствие инжекции носителей заряда.

$$C_{\text{диф}} = dQ_{\text{инж}}/dU$$

Т.к. диффузионная емкость определяется инжекцией, то ее можно связать с величиной теплового прямого тока.

$C_{\text{диф}} = \tau_n * I/\phi_T$, где τ – время жизни (электрона или дырки)

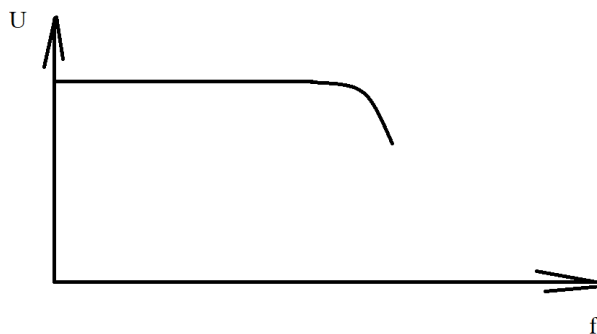


При подаче прямого напряжения со временем распределение электронов сдвигается в сторону р-области и становится все более пологим.

Т.о. градиент концентрации электронов при $t = 0$ – max, со временем будем уменьшаться примерно так, как это происходит при заряде конденсатора.

Обе емкости характеризуют инерционность диода, которая может проявлять себя двояко:

- 1) Чем больше C , тем медленнее способность переключаться с прямого на обратное включение и наоборот
- 2) Ухудшение выпрямляющих свойств диода: с повышением входной частоты диода работа выпрямляющей схемы начинается ухудшаться.



8. Дать описание основных видов пробоя р-п-перехода.

Пробоем диода называют резкое увеличение обратного тока при некотором значении обратного напряжения.

Туннельный пробой обусловлен туннельным эффектом, то есть «просачиванием» электронов сквозь тонкий потенциальный барьер. Он наблюдается в том случае, когда при подаче обратного напряжения возникает перекрытие энергетических зон, вследствие чего электроны могут

переходить из валентной зоны р-области в зону проводимости п-области

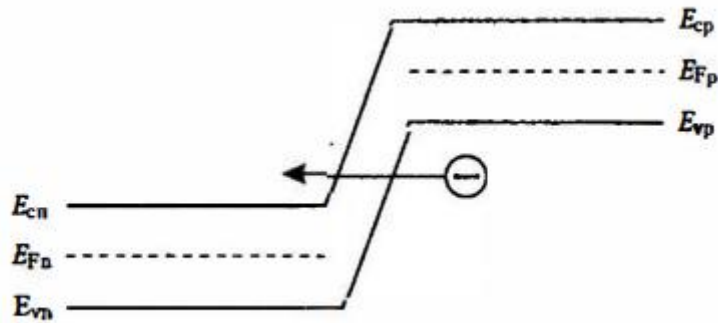


Рис. 3.4

Туннельный пробой с повышением температуры наступает при более низком обратном напряжении. Объясняется это тем, что с ростом температуры у полупроводников уменьшается ширина запрещенной зоны => уменьшается толщина р-п перехода => возрастает напряженность в поле перехода.

Лавинный пробой происходит в результате лавинного размножения носителей заряда в р-п-переходе под действием сильного поля. При высокой напряженности поля подвижные носители заряда на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов, под действием которой появляются новые пары носителей заряда.

Лавинный пробой происходит в широких р-п-переходах

Напряжение туннельного пробоя не превышает 4 В, в то время как напряжение лавинного пробоя больше 6 В.

При снижении концентрации примеси напряжение лавинного пробоя возрастает.

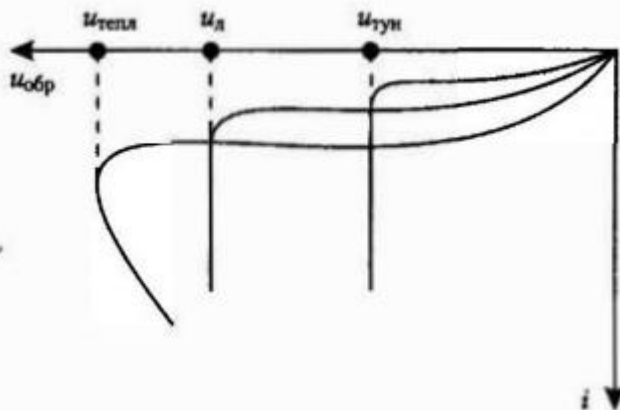


Рис. 3.6

Ток при лавинном и туннельном пробое может достигать очень больших значений, что может привести к перегреву перехода и возникновению теплового пробоя. Чтобы этого не произошло, обратное напряжение на диод всегда подают через ограничительный резистор.

ограничительный резистор.

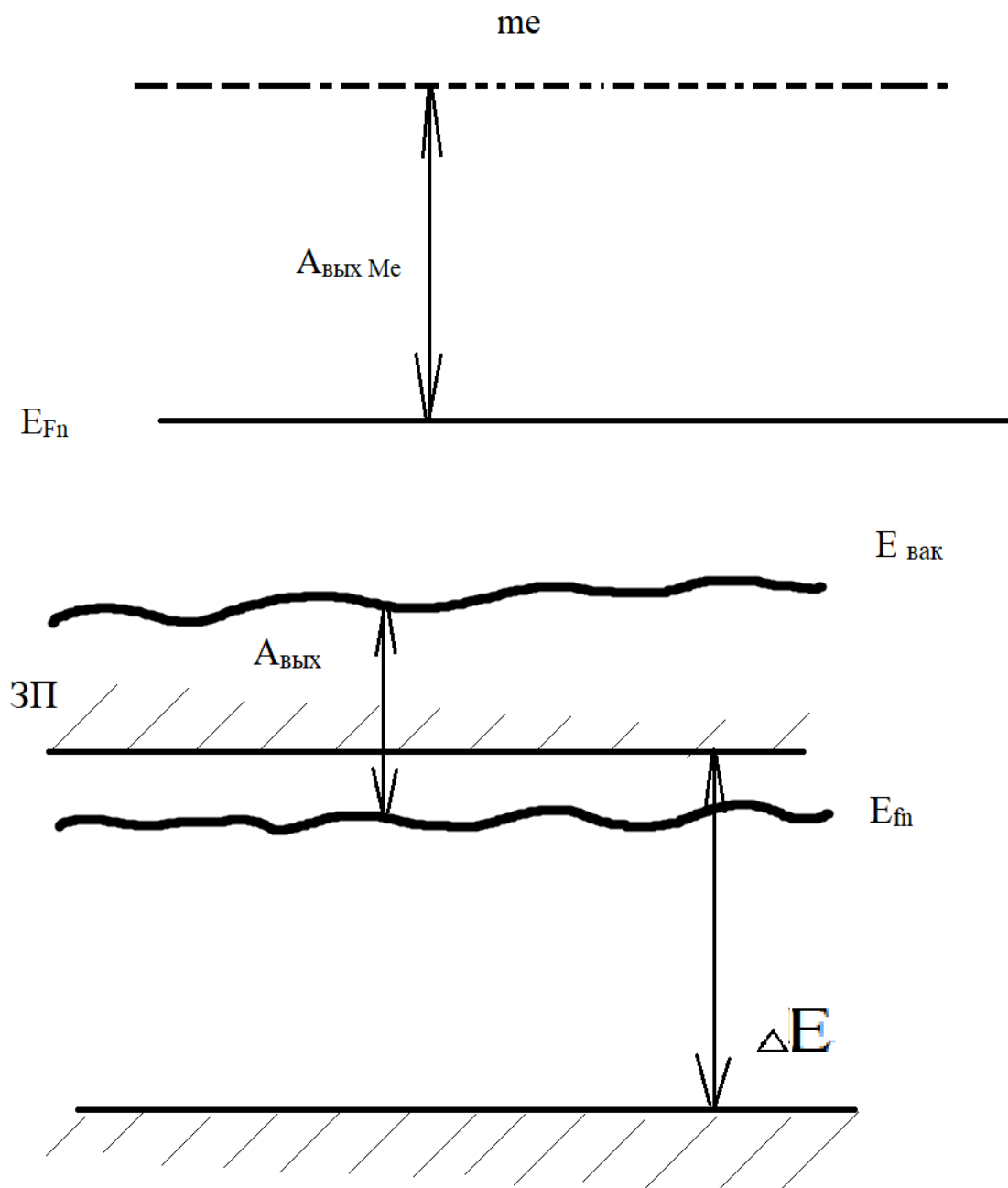
Тепловой пробой происходит в р-п-переходах с большими обратными токами. При этом рост тока при наступлении пробоя сопровождается

снижением обратного напряжения, так как с ростом тока уменьшается сопротивление перехода из-за повышения температуры.

У германиевых диодов при повышении обратного напряжения практически всегда создаются условия для возникновения теплового пробоя. У кремниевых диодов с очень высокой концентрацией примеси при повышении обратного напряжения даже при небольшом обратном напряжении наступает туннельный пробой. У кремниевых диодов с низкой концентрацией примеси условия для возникновения туннельного пробоя не возникают, поэтому при повышении обратного напряжения наступает лавинный пробой, который по мере роста обратного тока может перерасти в тепловой пробой. Однако при высокой температуре окружающей среды в кремниевых диодах при повышении обратного напряжения тепловой пробой может возникнуть раньше, чем лавинный пробой.

9. Описать принцип работы выпрямляющего контакта металл-полупроводник (перехода Шоттки), нарисовать ВАХ. Рассмотреть достоинства и недостатки диодов Шоттки по сравнению с диодами на основе рп-переход

Me – n – выпрямляющий при условии: $A_{\text{вых n}} < A_{\text{вых Me}}$ (работа выхода электрона из полупроводника/металла)

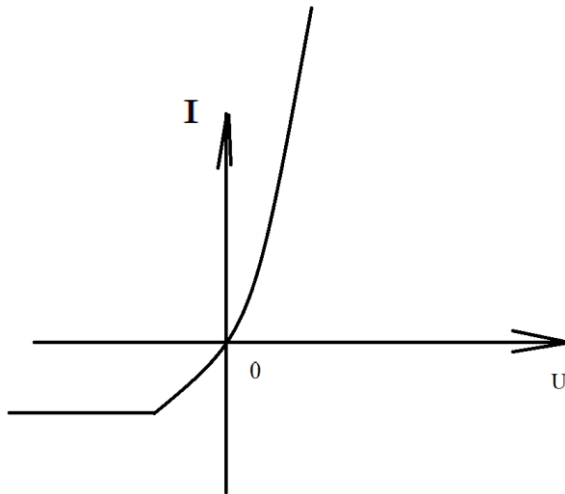


На зонной диаграмме можно выделить потенциальный барьер, обратный при данном контакте

При выполнении условия $A_{\text{вых n}} < A_{\text{вых Me}}$ происходит переход электрона в металл из приконтактного слоя полупроводника. Т.о. этот слой обедняется основными носителями \Rightarrow существенно увеличивается свое сопротивление.

Также аналогично переходу возникает равновесное состояние, которое может быть охарактеризовано контактной разностью потенциалов:

$\varphi_k = (A_{\text{вых ме}} - A_{\text{вых п}})/e$. Т.о. в контакте Ме – п/п возникает потенциальный барьер для перемещения электрона в металл. При обратном включении потенциальный барьер увеличивается => обратный ток обуславливается немногочисленными электронами, переходящих из металла в полупроводник.



ВАХ перехода Шоттке имеет форму аналогичную р-п перехода

Преимущества диодов Шоттке:

1. Выбор металла и легированного полупроводника происходит так, чтобы получить $\varphi_k <$ чем в р-п переходе(примерно в 2 раза)
2. Принципиальное отсутствие инжекции, т.к. участв. заряда одного

Типа => отсутствие процессов накопления и рассасывания зарядов в контактных областях. Т.о. длительность переходных процессов меньше, чем у р-п переходов

Недостаток: $I_{\text{обр}}$ больше, чем у диодов р-п перехода: низкие напряжение пробоя

10. Отличия реального диода от идеального рп-перехода, отличия германиевых и кремниевых диодов: (дать описание и проиллюстрировать на ВАХ).

ВАХ реального диода отличается от ВАХ идеального р-п-перехода. При прямом включении эти отличия обусловлены рекомбинацией носителей заряда в р-п-переходе и падением напряжения на сопротивлении базы диода r_b . Рекомбинация в переходе приводит к дополнительному возрастанию прямого тока, поэтому начальный участок прямой ветви ВАХ реального диода проходит несколько выше идеальной ВАХ. ВАХ реального диода отклоняется от идеальной ВАХ, на ней появляется линейный участок, наклон которого определяется величиной r_b . Обратный ток реального диода может значительно превышать обратный ток идеального р-п-перехода, т. к. помимо теплового тока I_T он включает в себя ток утечки I_y и ток термической генерации носителей заряда в переходе $I_{ТГ}$.

ВАХ германиевого и кремниевого диодов. Прямые ветви ВАХ имеют похожий вид, однако ВАХ кремниевого диода находится правее ВАХ германиевого диода, что объясняется разной величиной контактной разности потенциалов их р-п-переходов. У кремниевых диодов прямые напряжения оказываются больше, чем у германиевых. Кремниевые диоды имеют обратные токи гораздо меньшие, чем германиевые, а разная форма обратных ветвей их ВАХ объясняется различным соотношением составляющих обратного тока

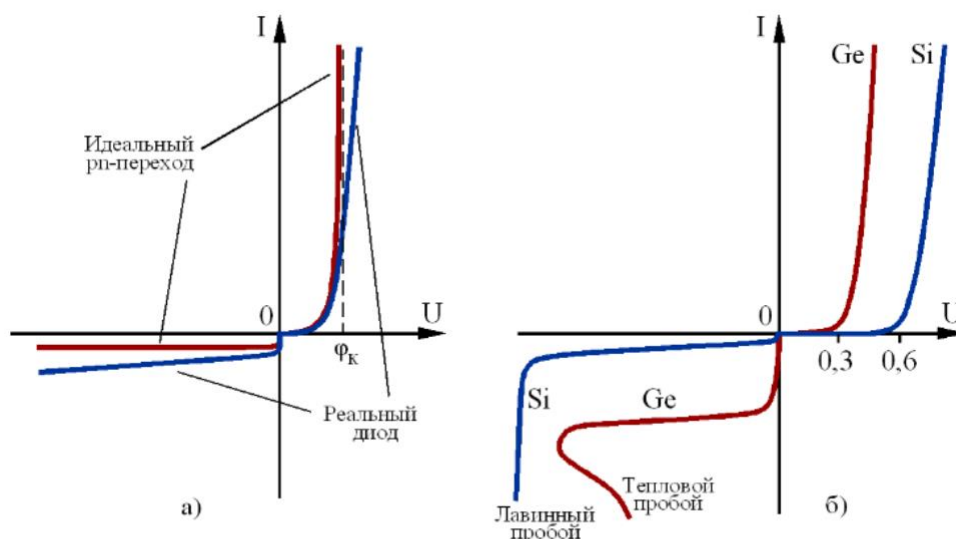


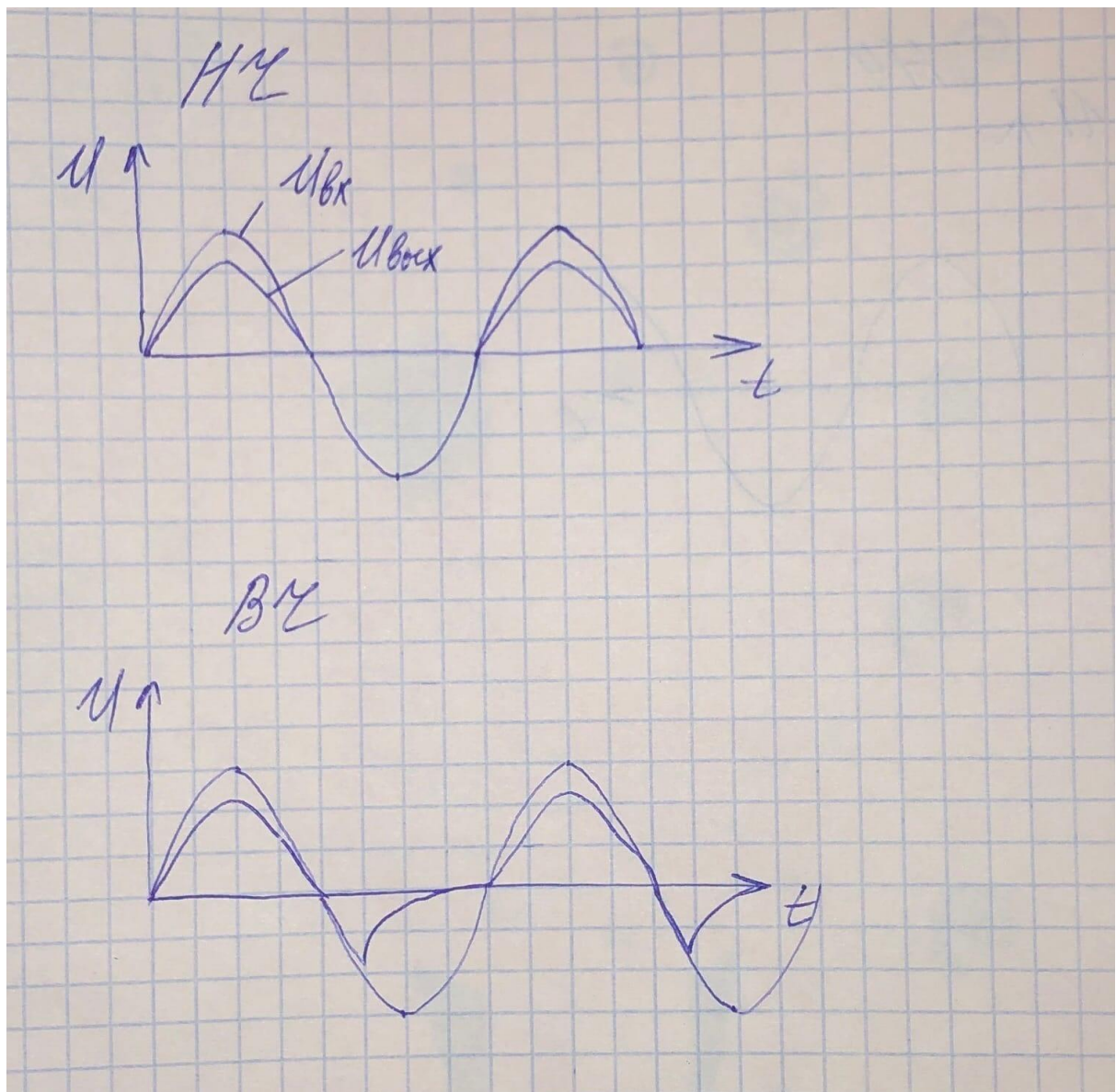
Рис. 3. ВАХ идеального р-п-перехода и реального диода (а); ВАХ германиевого и кремниевого диодов (б)

11. Описать работу диода на высоких частотах (временные диаграммы с пояснением).

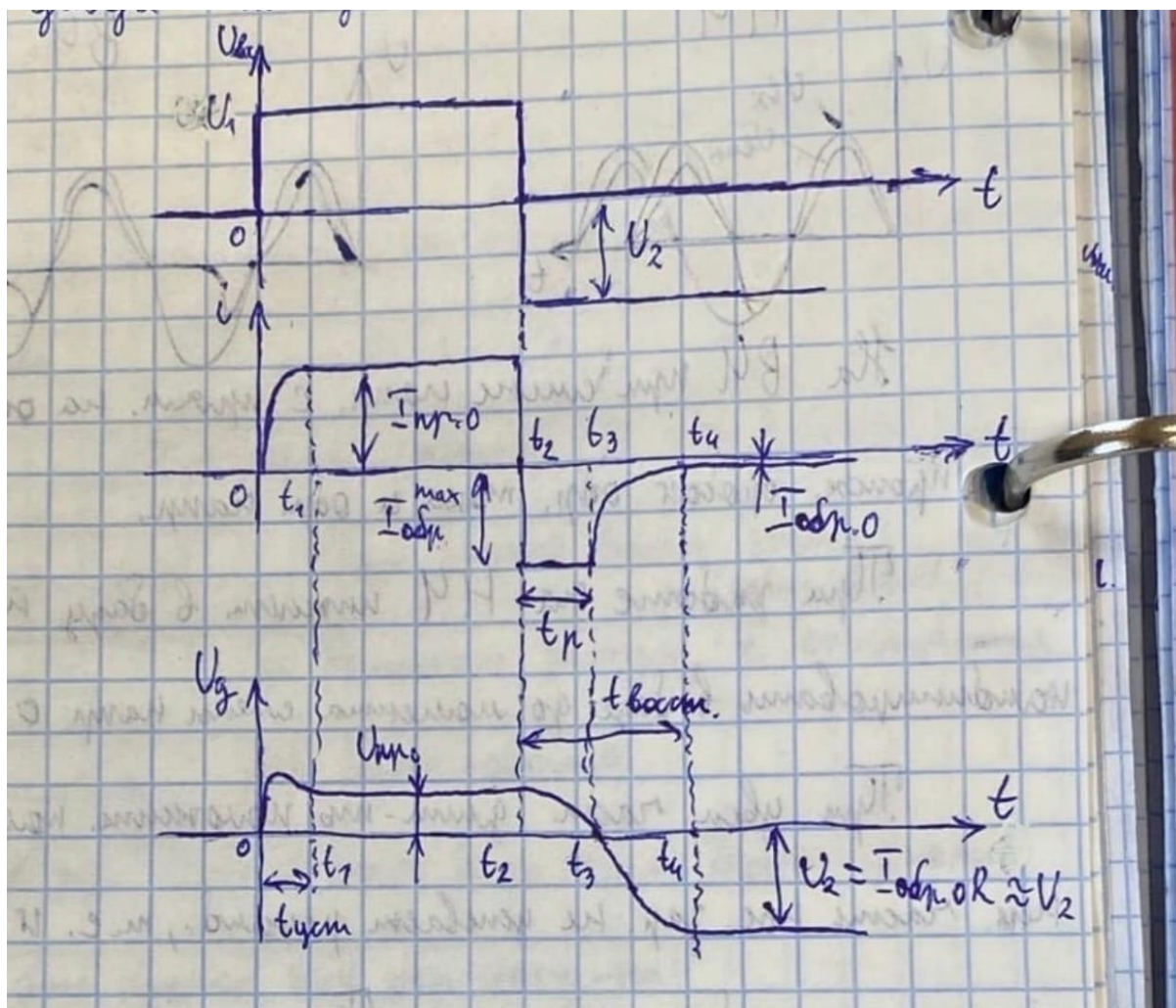
На ВЧ при смене напряжения с прямого на обратное в выпрям. схеме происходит бросок обратного тока и обратного напряжения.

При работе на НЧ инжектирующие в базу носители заряда успевают рекомбинировать в базе до моменты смены направления с прямого на обратное.

При увеличении частоты длительность положит. полупериод уменьшается, следовательно на нем часть носителей заряда не успевает рекомбинироваться, т.е. моменту смены в базе остаются избыточные неосновные носители. При смене с прямого на обратное эти носители совершают экстракцию в эмиттер, образуя бросок обратного тока. С увеличением f зар. неосн. заряды, накопленные в базе увеличиваются, следовательно $I_{обр.}$ и $U_{обр.}$ увеличиваются



12. Описать работу диода в импульсном режиме (временные диаграммы с пояснением).

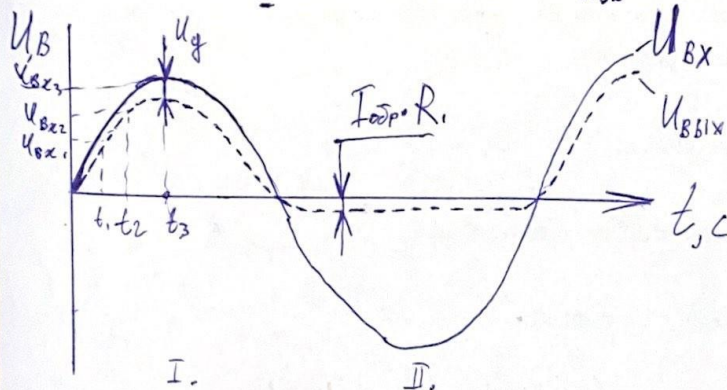
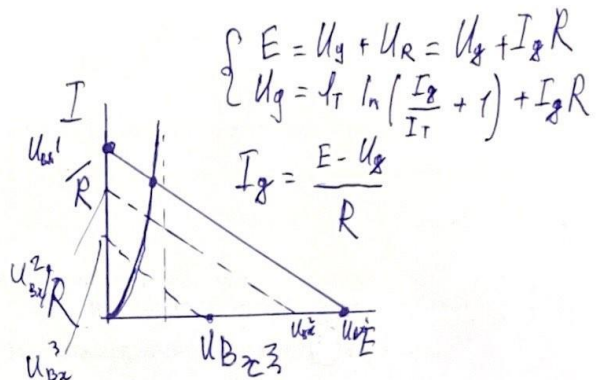
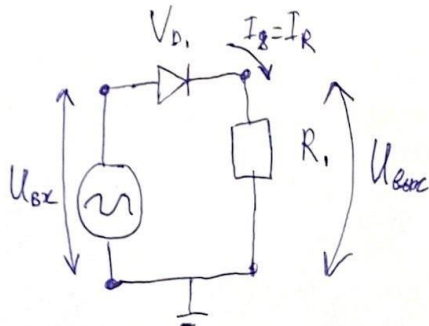


При подаче импульса на прямое напряжение на интервале $(0;t)$ происходит плавное изменение тока и напряжение на диоде, при этом изменение заканчивается в момент времени t_1 и ток и напряжение принимают значения $I_{пр0}$ и $U_{пр0}$. На этом интервале происходит установление прямого напряжения. На нем может действовать эффект модуляции сопротивления базы. Вследствие инжекции носители заряда из эмиттера в базу сопротивление базы имеет максимальное значение при $t=0$, а в интервале $(0;t_1)$ уменьшается. Аналогично ведет себя U_d .

13. Нарисовать схему и временные диаграммы однополупериодного выпрямителя без конденсатора, дать описание его работы.

Вопрос №13

Схема однополупериодного выпрямителя без конденсатора



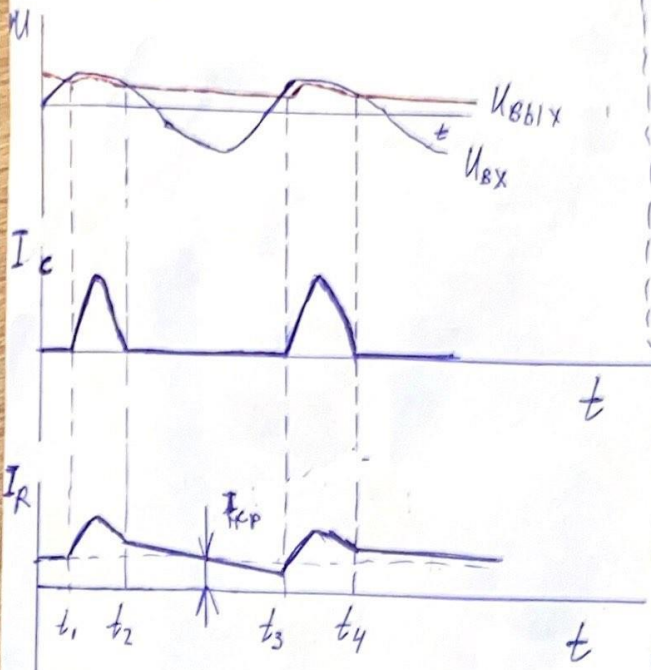
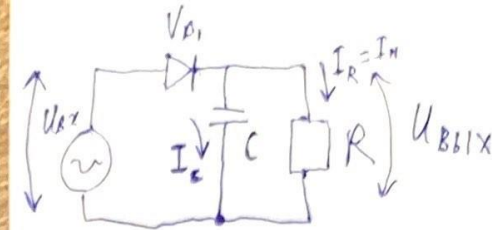
- Выпрямление - преобразование переменного тока в ток одного направления.
- В первый полупериод приложено прямое напряжение.
 \Rightarrow диод открыт, протекает прямой ток. $I_R = I_g$
 Во второй полупериод приложено обратное напряжение
 \Rightarrow диод закрыт, протекает обратный ток. $I_{обр} \ll I_{пр}$
 а, значение напряжения равно $U_R = I_{обр} \cdot R$
- Однополупериодная схема не выгодна, т.к. использует только энергию одного полупериода, используется только в маломощных выпрямителях.

14. Нарисовать схему и временные диаграммы однополупериодного выпрямителя с конденсатором, дать описание его работы. Дать вывод

приближенной формулы для расчета необходимой ёмкости конденсатора.

№ 14

ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С КОНДЕНСАТОРОМ



Вывод приближенной ёмкости конденсатора

$$i_c(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt}$$

$$i_c \approx \text{const} \cdot I = I_{\text{н.ср}}$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt$$

$$I_{\text{н.ср}} \approx \frac{C \Delta U}{t_{\text{разр}}}$$

$$C \geq \frac{I_{\text{н.ср}} \cdot t_{\text{разр}}}{\Delta U}$$

$$t_{\text{зар}} \ll t_{\text{разр}}$$

$$t_{\text{зар}} + t_{\text{разр}} = T$$

$$C \geq \frac{I_{\text{н.ср}} t_{\text{разр}}}{\Delta U} \approx \frac{I_{\text{н.ср}} T}{\Delta U} = \frac{I_{\text{н.ср}}}{\Delta U \cdot f}$$

$0 \dots t_1$: VD_1 закрыт, конденсатор C разряжается

t_1 : $U_d \approx 0,5 \dots 0,6 V(S_i)$, VD_1 - начинает открываться

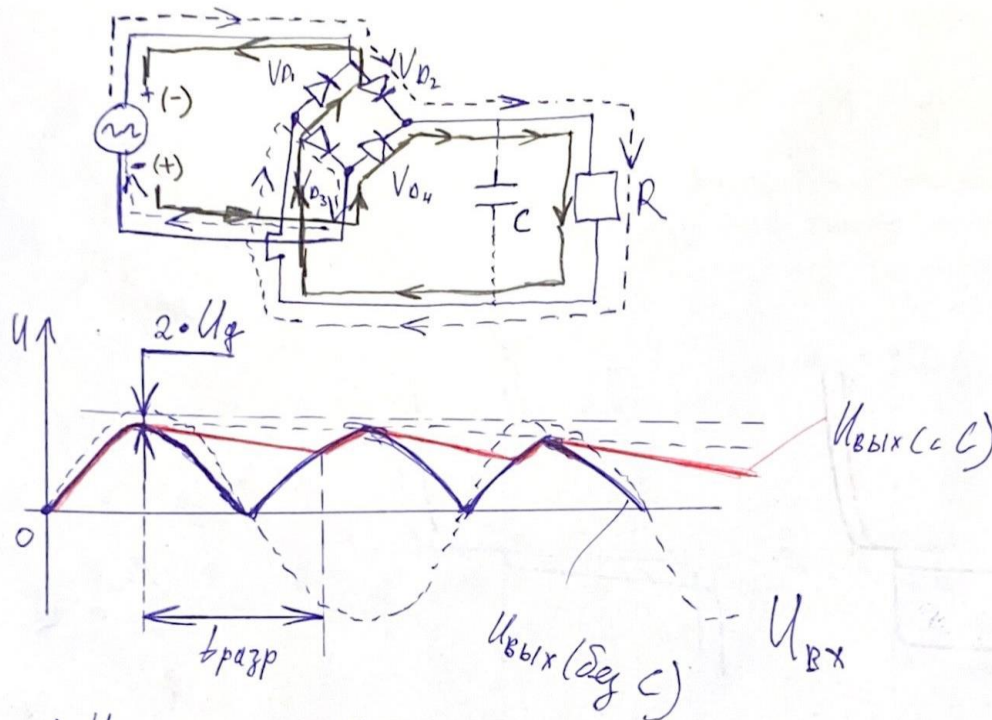
$t_1 \dots t_2$: $I_c \gg I_{\text{н.ср}}$, VD_1 открыт, конденсатор заряжается

t_2 : $U_d < 0,5 \dots 0,6 V$ диод начинает закрываться

$t_2 \dots t_3 \Rightarrow 0 \dots t_1$

15. Нарисовать схему и временные диаграммы мостового двухполупериодного выпрямителя без конденсатора и с конденсатором, дать описание его работы. Указать достоинства и недостатки схемы. (Аналогичный вопрос – по схеме двухполупериодного выпрямителя со средней точкой)

15. Двухполосный выпрямитель без конденсатора
и с конденсатором.
мостовая схема



1) $U_{\text{вх}} > 0$: $U_{\text{вых}}$ складывается из $U_{\text{вх}}$ на $2 \cdot U_{\text{д}}$, т.к. два открытых диода создают двойное падение напряжения
2) $U_{\text{вх}} < 0$: Направление тока нагрузки такое же, как и при $U_{\text{вх}} > 0$
достоинства:

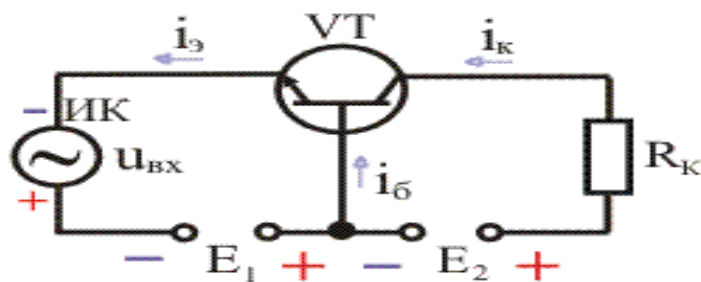
- более энергетически выгодно т.к. ток нагрузки протекает в течение обоих полупериодов
 - разряд конденсатора в 2 раза меньше
- \Rightarrow размер пульсации ≈ 2 раза меньше

недостатки:

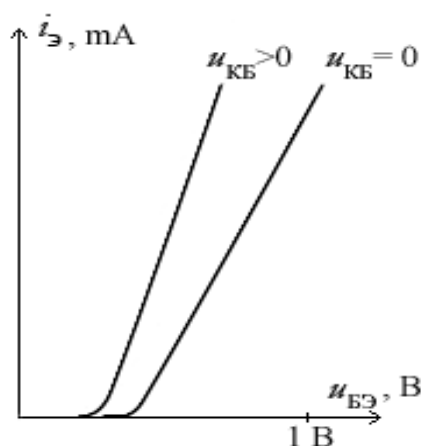
- напряжение падает больше т.к. два диода посл. проявляются при меньших напряжениях

16. Описать принцип работы биполярного транзистора в схеме с общей базой (ОБ). Нарисовать ВАХ.

Схема включения с общей базой

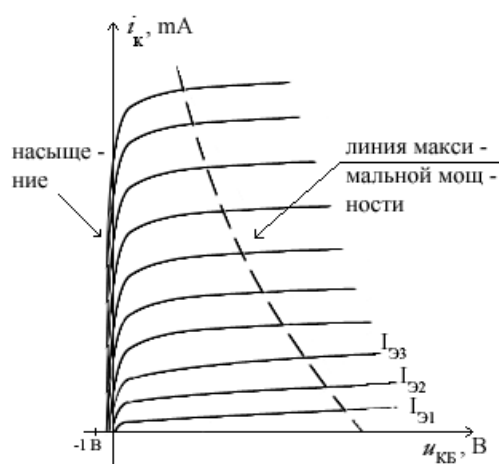


Входные ВАХ транзистора с общей базой:



Входные характеристики здесь в значительной степени определяются характеристикой открытого эмиттерного р - n -перехода, поэтому они аналогичны ВАХ диода, смещенного в прямом направлении. Сдвиг характеристик влево при увеличении напряжения $u_{КБ}$ обусловлен так называемым эффектом Эрли (эффектом модуляции толщины базы), заключающимся в том, что при увеличении обратного напряжения $u_{КБ}$ коллекторный переход расширяется, причем в основном за счет базы. При этом толщина базы как бы уменьшается, уменьшается ее сопротивление, что приводит к уменьшению падения напряжения $u_{БЭ}$ при неизменном входном токе.

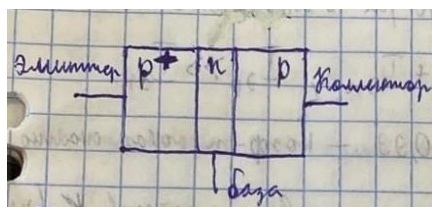
Выходные ВАХ транзистора с общей базой:



Из рисунка видно, что ток коллектора становится равным нулю только при $u_{KB} < 0$, то есть только тогда, когда коллекторный переход смещен в прямом направлении. При этом начинается инжекция электронов из коллектора в базу. Эта инжекция компенсирует переход из базы в коллектор электронов эмиттера. Данный режим называют режимом насыщения. Линии в области $u_{KB} < 0$, называются линиями насыщения. Ток коллектора становится равным нулю при $u_{KB} < -0,75$ В. При $u_{KB} > 0$ и токе эмиттера, равном нулю, транзистор находится в режиме отсечки, который характеризуется очень малым выходным током, равным обратному току коллектора I_{K0} , то есть график ВАХ, соответствующий $i_{\Theta} = 0$, практически сливается с осью напряжений.

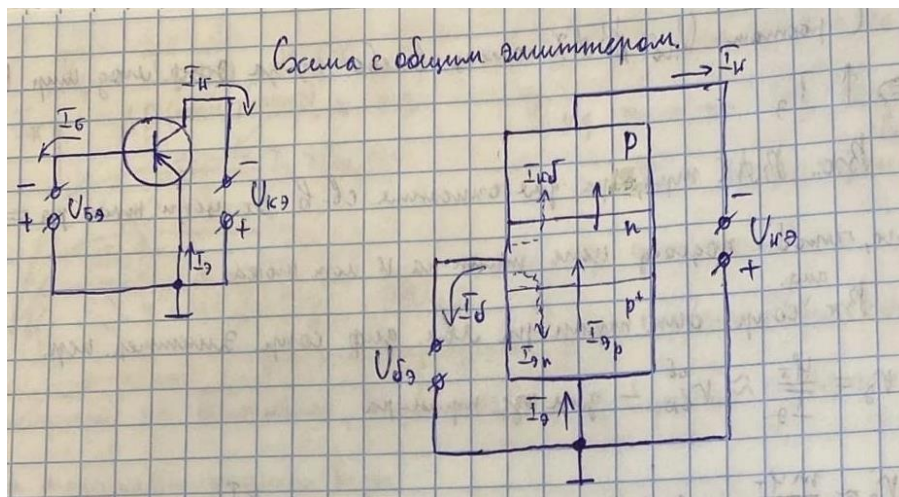
17. Описать принцип работы биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ). Нарисовать ВАХ.

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор, с двумя взаимодействующими р-п переходами и тремя внешними выводами, усилительные свойства которых обусловлена инжекцией и экстракцией неосновных носителей заряда.



Одна из крайних областей легирована больше – эмиттер, а другая область – коллектор.

База является общей областью для р-п перехода, имеющих в транзисторе.



Процессы с ОЭ те же, что и в схеме с ОБ. При увеличении по модулю $U_{бэ}$, высота барьера эмит. перехода уменьшается, что приводит к усилению инжекции $\Rightarrow I_\delta$ увеличивается $\Rightarrow I_\kappa$ увеличивается. С другой стороны, с увеличением $U_{бэ}$ вследствие увеличения инжекции дырок из Э в Б увеличивается число дырок, рекомбинация в Б с электронами \Rightarrow увеличивается число электронов, происходящих из базы цепи в базу транзистора для компенсации электронов. Т.о. увеличение рекомб. составляющих $I_\delta \Rightarrow I_\delta$ увеличивается, $I_\delta \ll I_\delta, I_\kappa$.

Между I_κ и I_δ имеется прямо пропорциональная связь, т.о. при изменении I_δ меняется I_δ .

Уши. св-ва по току в схеме с ОЭ

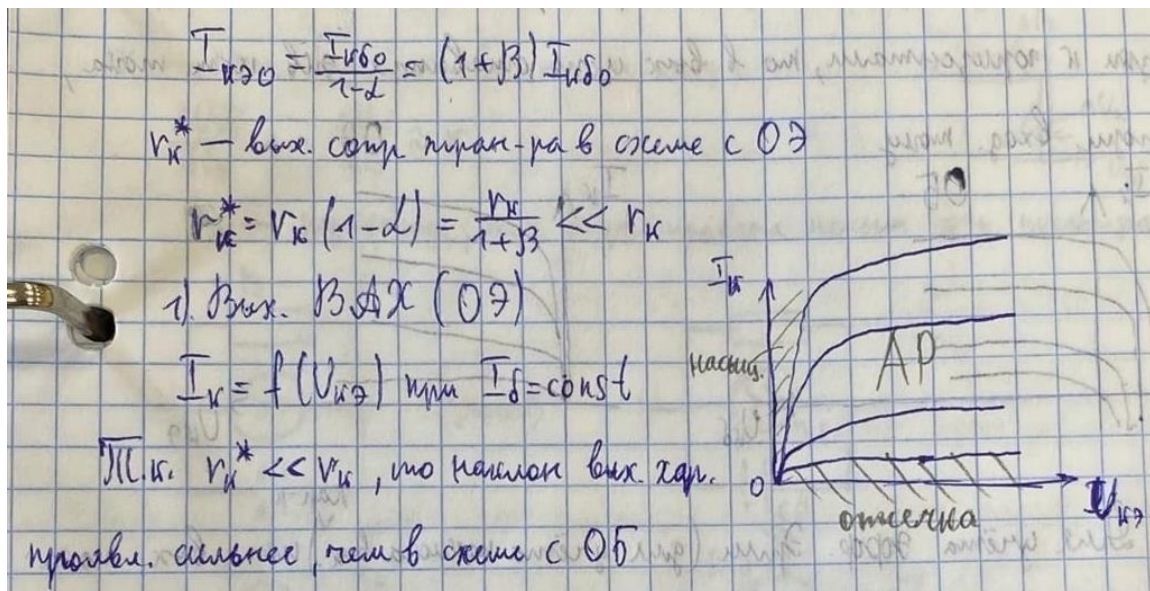
$$I_\kappa \approx \beta I_\delta$$

$$I_\kappa = \alpha I_\delta + I_{\kappa\delta_0} + \frac{U_{\kappa\delta}}{r_\kappa} = \alpha(I_\kappa + I_\delta) + I_{\kappa\delta_0} + \frac{U_{\kappa\delta}}{r_\kappa}$$

$$I_\kappa(1-\alpha) = \alpha I_\delta + I_{\kappa\delta_0} + \frac{U_{\kappa\delta}}{r_\kappa}$$

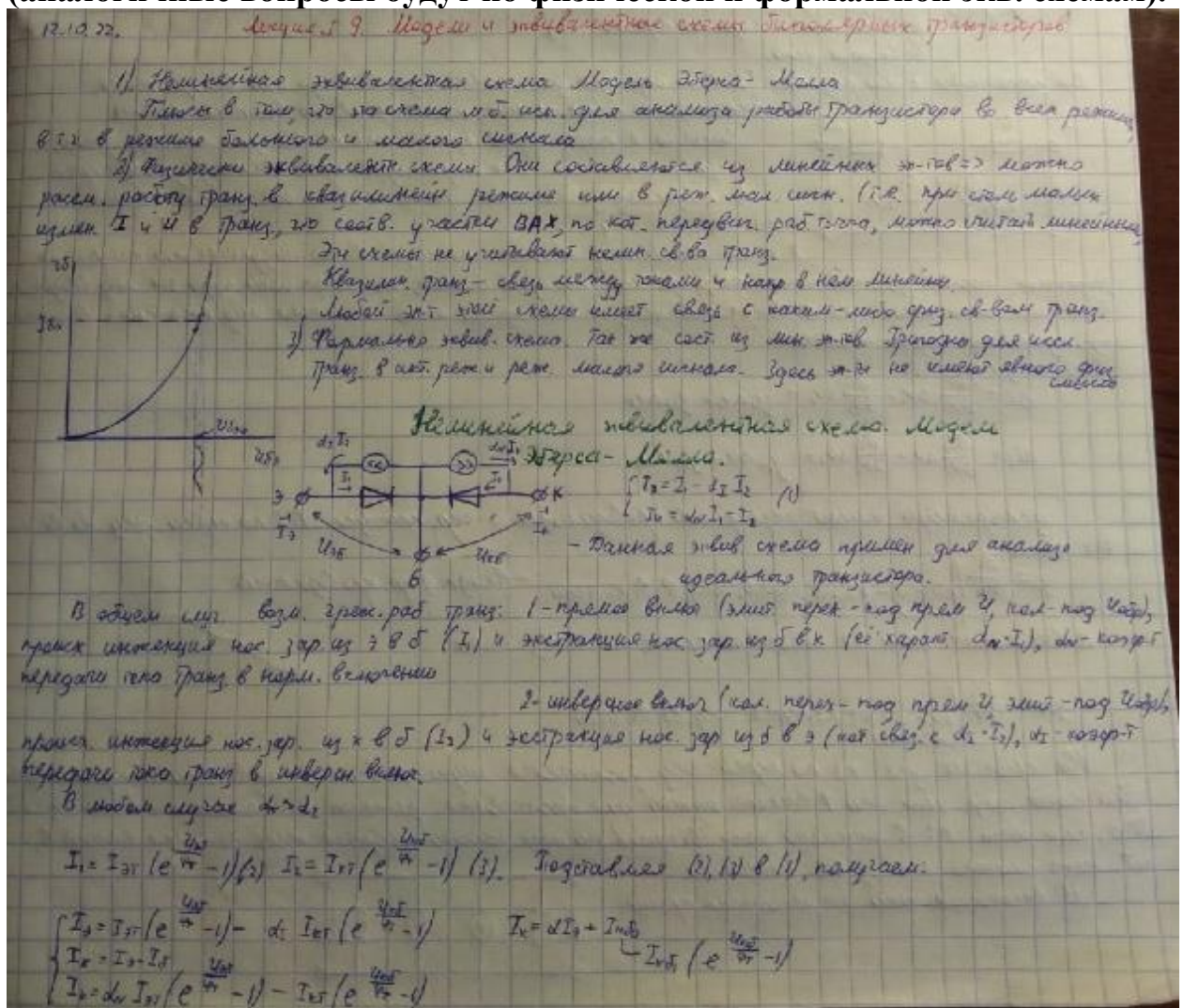
$$I_\kappa = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_\delta + \frac{I_{\kappa\delta_0}}{1-\alpha} + \frac{U_{\kappa\delta}}{r_\kappa(1-\alpha)} = \beta I_\delta + I_{\kappa\delta_0} + \frac{U_{\kappa\delta}}{r_\kappa^*}$$

Т.к. эмит. переход под прямым напряжением, а колл. Переход под обратным напряжением, то $U_{бэ} \ll U_{кб} \Rightarrow U_{кб} \text{ примерно } = U_{кэ}$



18. Перечислить и кратко охарактеризовать виды эквивалентных схем биполярного транзистора и границы их применения. Нелинейная эквивалентная схема биполярного транзистора, уравнения Эберса-Молла.

(аналогичные вопросы будут по физической и формальной экв. схемам).



Иллюстрированное выше схемно показывает для оптим. транз. на пост. токе и малых частотах, но кб. еще не проявил себя эффект транз. для этих частот св. в транз. привод. схема м.б. усложнена из-за введения элементов рп перед (обратными) дифференциалами.



Формализованная модель



z-параметры

$$z_1 = \frac{u_1}{i_1}, z_2 = \frac{u_2}{i_2}$$

$$z_{12} = \frac{u_1}{i_2} = \frac{u_2}{i_1}$$

$$z_{21} = \frac{u_2}{i_1} = \frac{u_1}{i_2}$$

$$z_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} \Big|_{u_2=0}$$

$$z_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial i_2} \Big|_{u_1=0}$$

$$z_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial i_2} \Big|_{u_1=0}$$

$$z_{21} = \frac{\partial u_2}{\partial i_1} \Big|_{u_2=0}$$

$z_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial i_1} \Big|_{u_2=0}$ - входное дифференциальное сопр. при условии хол. хода по обратной току в выходной цепи

$z_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial i_2} \Big|_{u_1=0}$ - выходное дифференциальное сопр. при условии хол. хода по прямой току в выходной цепи

Все параметры z-параметры [Ом] и сопр. при хол. ходе по прямой или обратной цепи.



Х.х. по прямой току означает последов. замык индуктивности, которая на заданной частоте должна иметь сопр. на неск. порядков больше, чем сопр. цепи, куда эта инд. вводится.

Если мы хотим обеспечить х.х. в выходной цепи, то необходимо очень большое инд. (особенно большое инд. нужно на низких частотах).

Система y-параметров

$$y_{11} = \frac{\partial i_1}{\partial u_1} \Big|_{u_2=0}, y_{12} = \frac{\partial i_1}{\partial u_2} \Big|_{u_2=0}$$

$$y_{21} = \frac{\partial i_2}{\partial u_1} \Big|_{u_2=0}, y_{22} = \frac{\partial i_2}{\partial u_2} \Big|_{u_2=0}$$

y-параметры имеют размерность проводимости и сопр. при з.с. к з по прям. току в вх. или вых. цепи.

$y_{11} = \frac{\partial i_1}{\partial u_1} \Big|_{u_2=0}$ - к з по прям. току в вх. цепи, - входн. диф. проводимость

В выходной цепи к з означает паралл. замк в индуктивн.

$y_{22} = \frac{\partial i_2}{\partial u_2} \Big|_{u_1=0}$ - к з по обрат. току в вх. цепи

На практике усл. к з по прям. току достигается шунтированием соотв. цепи конденсатором. Чем ниже сопр. цепи, тем больше нужно для обеспечения режима к з. (Понятно, чем больше частота, тем больше емкость С, но, очень сложно реализовать технически).

В выходной цепи это обеспечивается паралл.



19. Дать описание системы h-параметров биполярного транзистора. Обосновать преимущество системы h-параметров перед системами z- и y-параметров.

DATE

$$h_{11} = \frac{\partial i_{Bx}}{\partial i_{Bx}} \Big|_{i_{Cx}=0, (i_{Cx}=\text{const})}$$
 - коэффициент обратной связи по напряжению при заданном постоянном току в вх. цепи.

$$h_{21} = \frac{\partial i_{Cx}}{\partial i_{Bx}} \Big|_{i_{Cx}=0, (i_{Cx}=\text{const})}$$
 - коэффициент передачи тока при условии КЗ по переменному току в вх. цепи.

$$h_{22} = \frac{\partial i_{Cx}}{\partial i_{Cx}} \Big|_{i_{Bx}=0, (i_{Bx}=\text{const})}$$
 - дифференциальная проводимость транзистора при условии холостого хода по переменному току в вх. цепи.

Достоинства H-параметров:
 Их проще практически измерить (особенно на низких частотах), проще обеспечить условие КЗ в высокоомной вх. цепи, проще обеспечить холостого хода в низкоомной вх. цепи.

Транзиентно H-параметры используются при расчете усилителей на транзисторах, работающих в режиме малого сигнала.

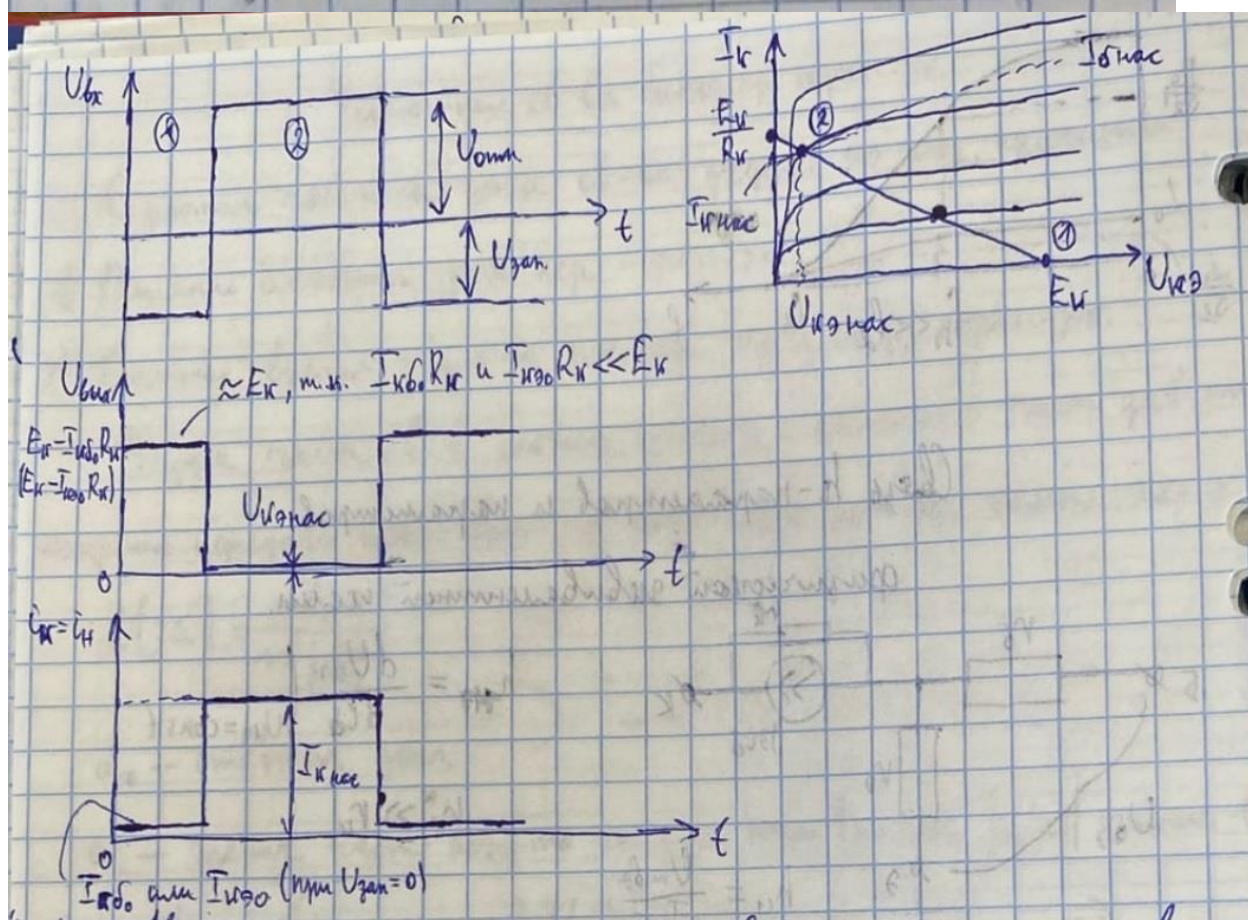
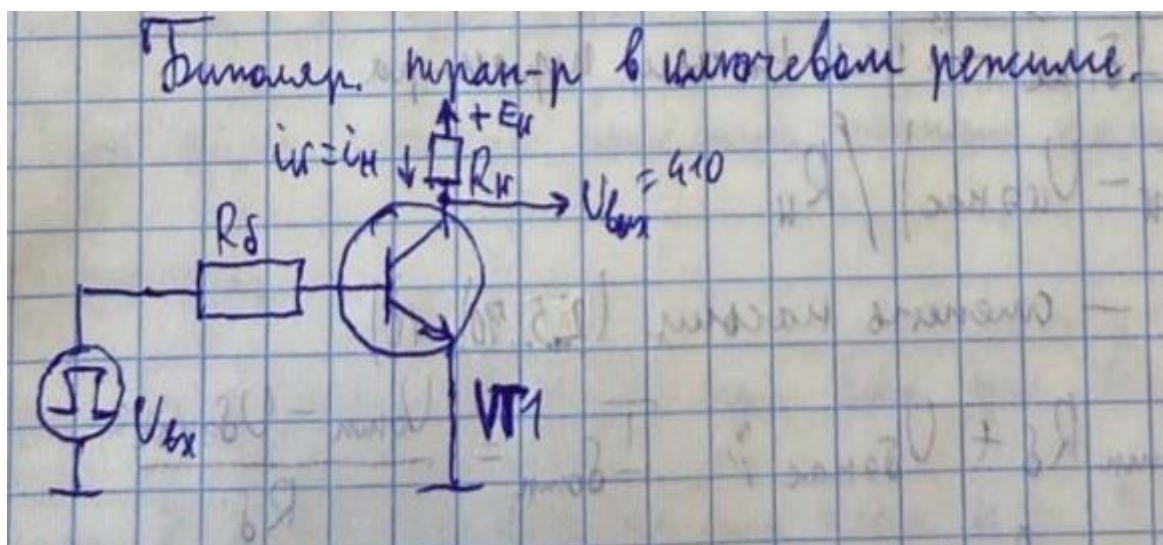
Эквивалентная схема:

$h_{11} \approx r$
 $h_{21} \approx \beta$

В общем случае H-параметры имеют комплексный характер.

Для различных схем включения транзистора H-параметры имеют различные значения.

20. Нарисовать схему, временные диаграммы и описать работу простейшего ключа на биполярном транзисторе. Привести основные расчетные формулы.



при $U_{\text{кз}} < 0$ на инт-ле 1 на Б подается обр. напр. \Rightarrow тран-р в режиме
 отсечки $\Rightarrow i_{\text{к}} \approx I_{\text{кдо}}$ ^{малый ток} \Rightarrow тран-р не работает

$$U_{\text{кз}} = 0: i_{\text{к}} \approx I_{\text{кдо}} = I_{\text{кдо}} (1 + \beta) \text{ — всё ещё малый ток}$$

На 2 инт-ле тран-р в режиме насыщ., т.е. прямое
 напр. от инт-а 2-перехода ($U_{\text{омн}}$)

$$I_{\text{омн}} > I_{\text{бнас}} = \frac{I_{\text{кнас}}}{\beta} \text{ — при насыщ. тран-ра}$$

$$I_{\text{кнас}} = (E_{\text{к}} - U_{\text{кнас}}) / R_{\text{к}}$$

$$S = \frac{I_{\text{бомн}}}{I_{\text{бнас}}} \text{ — степень насыщ. (2...5...10)}$$

$$U_{\text{омн}} = I_{\text{бомн}} R_{\text{д}} + U_{\text{бнас}}; \quad I_{\text{бомн}} = \frac{U_{\text{омн}} - U_{\text{бнас}}}{R_{\text{д}}}$$

Из отсечки и обр. тран-р переходят не мгновенно, а в мер. $t_{\text{ин}}$
 и $t_{\text{выкл}} \lesssim 100 \text{ нс}$

На $t_{\text{с}}$ — спад $I_{\text{к}}$ с $I_{\text{наб}}$, ассимптот. стремится к негас-
 нутному знач. $\beta I_{\text{бзан}}$