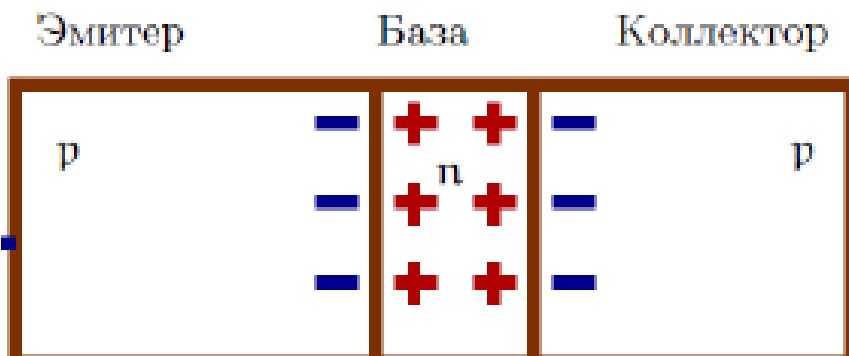


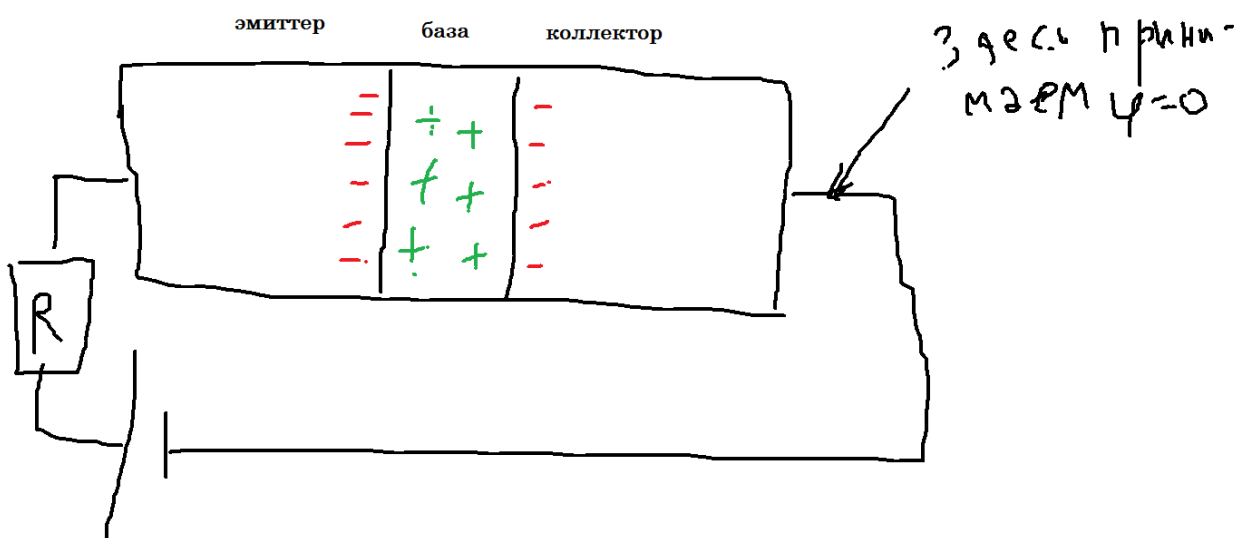
В этой методичке мы обсудим внутреннее устройство биполярного и полевого транзисторов. Данная информация создаст дополнительные нейронные связи в вашей голове и ответит на теорвопросы к экзамену, а вот задачи решать не поможет. Так что если вам интересно, или вы готовитесь уже к экзамену – читайте. Если нужно быстро научиться решать задачи – этот документ закрывайте и идите смотреть следующую методичку, где автором была решена задача с КР2 на транзисторы.

Биполярный транзистор. Это вот такая вот фигня:



Напомним, как образуются на нём заряды: в кристалл p-типа требуется электроны для валентности, они сдёргиваются из соседнего кристалла n-типа (где как раз с точки зрения валентности избыток электронов). В результате кристаллы p-типа у границы заряжены положительно, а n-типа – отрицательно.

Включим биполярный транзистор к источнику напряжения через сопротивление, чтобы у нас ничего не сгорело. Включил эмиттер и коллектор, базу пока не трогаем.



Вот бежит положительный заряд по транзистору слева направо, и в эмиттере ему очень даже хорошо жить. Добегает до первой по ходу движения границы (левой). Хочется ли ему пересекать эту границу? Конечно, нет: будет нужно оставить отрицательные заряды в эмиттере и шагнуть навстречу положительным в базе. А это означает, что на границе скачок потенциала.

Потом на второй границе опять скачок потенциала, но уже с другим знаком.

Нарисуем график для потенциала:



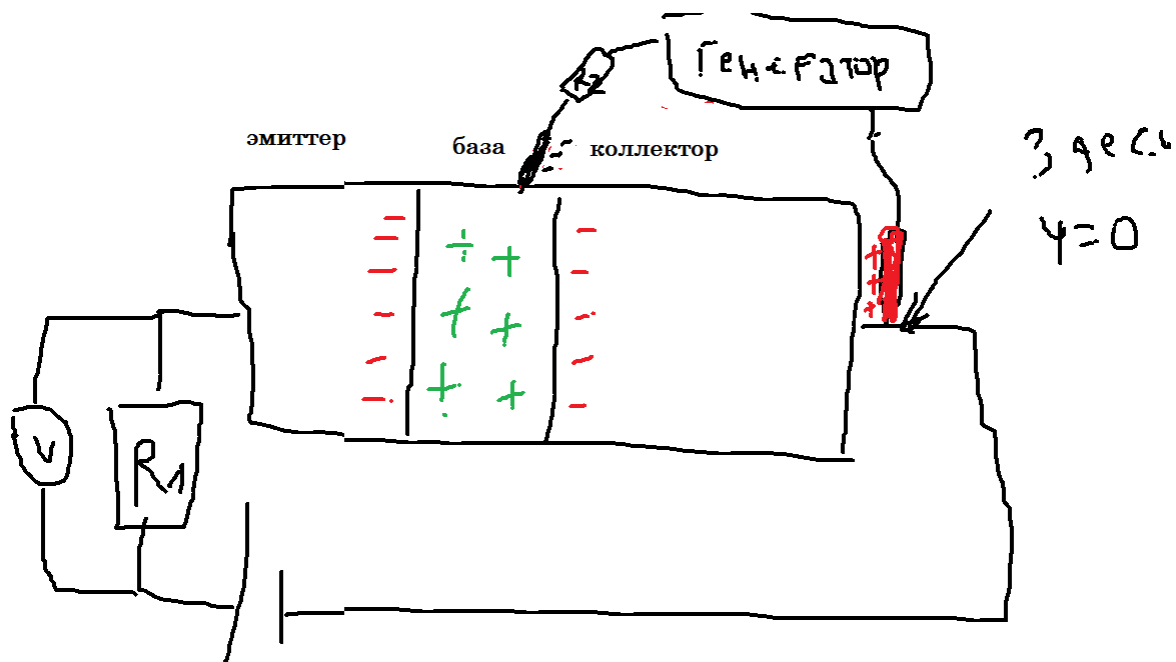
Где есть достаточно большой $\varphi_{\text{зап}}$ – запирающий потенциал.

Утверждение без доказательства, в которое вам придётся поверить: ток чем больше, тем меньше этот $\varphi_{\text{зап}}$. Вообще это не совсем очевидно, ведь после «невыгодной» границы следует «выгодная» той же высоты. А для электронов, идущих справа налево, сначала вообще будет «выгодная», а затем «невыгодная». Неужели эффект от выгодной не перекрывает эффект от невыгодной? Так вот, нет. Если я не ошибаюсь, это связано с квантовыми эффектами: электрон может протуннелировать через базу (её специально для этого делают тонкой-тонкой), и вероятность туннелирования очень сильно зависит от высоты потенциального барьера. Очень сильно – это экспоненциально, если не ошибаюсь.

В методичке к 324 праку

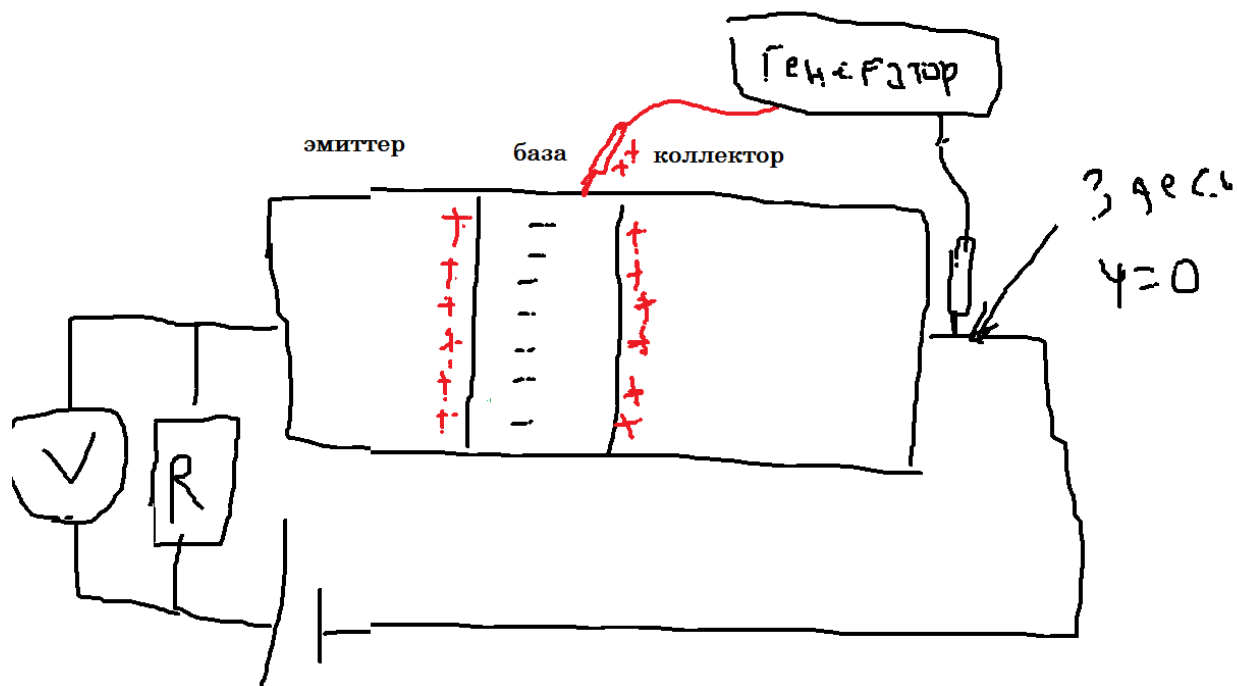
http://genphys.phys.msu.ru/rus/lab/elmag/Lab324_2021.pdf более сложное объяснение, через зоны проводимости. Но мне больше нравится объяснение через туннелирование.

И этот потенциальный барьер совершенно не нравится Васе, сидящему на установке. Ему хочется большой ток через транзистор! Вспомнив, как его батя занижал «Ладу», Вася решает сделать так же – занизить потенциал на базе! Он предлагает стащить генератор напряжения с радиопрака и воткнуть чёрный крокодильчик от него, полный электронов, на базу. Тогда потенциальный барьер занизится, и его сможет преодолеть большее число электронов.



Сопротивление R_2 тут чисто для того, чтобы всё не сгорело.

Наряду с $n-p-n$ транзисторами существуют и $p-n-p$ транзисторы. Там всё ровно наоборот:



Вася был приятно удивлён возросшим током в цепи. Причём он меняет напряжение на генераторе чуть-чуть, а ток в цепи возрастает многократно (понятно, что больше \mathcal{E}/R_1 он стать не может, но будем считать, что R_1 очень мало, и нам до \mathcal{E}/R_1 как до луны).

Вятчанин приводит следующую аналогию: есть труба с текущей водой. И есть затворка. Усилий на движение затворки прилагается немного. Вы же легко краны на смесителе у себя в ванной крутите? А эффект колоссальный – вы затыкаете большой поток воды. Ну вы попробуйте заткнуть поток воды из крана ладонью. Лучше краны крутить ☺

Транзисторы, кстати, именно поэтому называют вентиляльными элементами. К ним ближе всего реостат. Только там мы меняем проводимость элемента механически, а тут – электрически, подавая что-то на базу.

Вася задумался, можно ли это как-то использовать. Усилители! Точно же. На ядерных и атомных праках часто бывает, что один электрон в секунду. Ну это ни о чём, это 10^{-19} А. Такое невозможно зарегистрировать. Теперь этот слабенький сигнал заменит генератор. А глядя на вольтметр, мы будем видеть тот же сигнал, но многократно усиленный.

Всем, у кого установлен Circuit Simulator, рекомендую найти там биполярный транзистор и потыкаться.

Есть ограничения: на рекомбинацию требуется время. Особенно это важно, если на вход мы подаём высокочастотное переменное напряжение. Биполярный транзистор большие частоты не выдержит. В этом плане лучше полевой транзистор, к которому мы и переходим. Вообще, полевой транзистор сейчас практически вытеснил биполярный, просто биполярный и проще, и исторически был сделан раньше.

Если в биполярном транзисторе были коллектор, база и эмиттер, то в полевом – исток, база и сток.

Сразу: полевым транзистор называется не потому, что растёт в поле, и не в честь Петра Валерьевича, а потому что управление базой осуществляется полем. Давайте я поясню этой фразе.

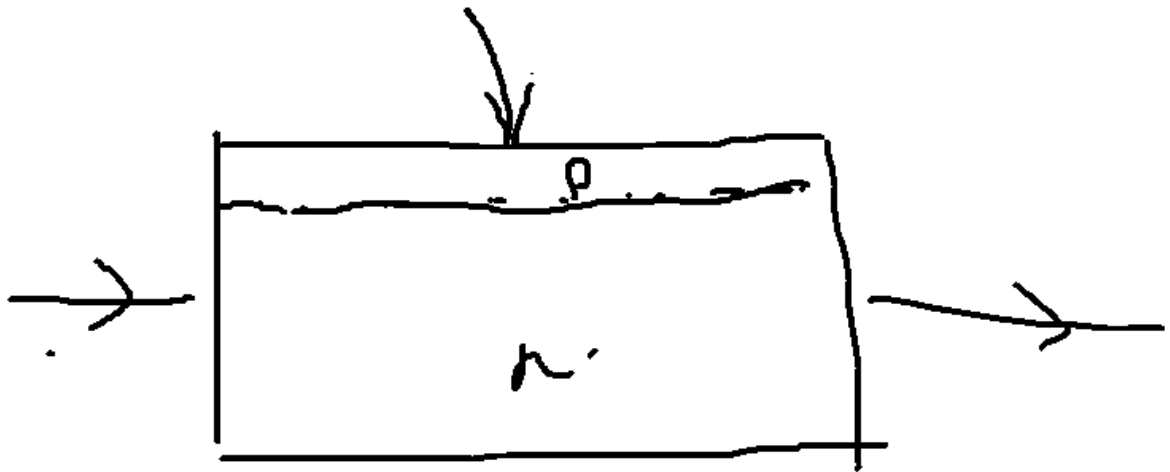
В реостате управление (т.е. регулировка сопротивления) осуществляется человеком механически.

В биполярном транзисторе управление осуществляется током (на базу или с базы).

В полевом транзисторе управление осуществляется полем.

Т.е. если мы к базе биполярного транзистора подключаем провод, и на базу бежали электроны, то к затвору полевого транзистора нам даже касаться не нужно.

Рассмотрим р-канальный транзистор.



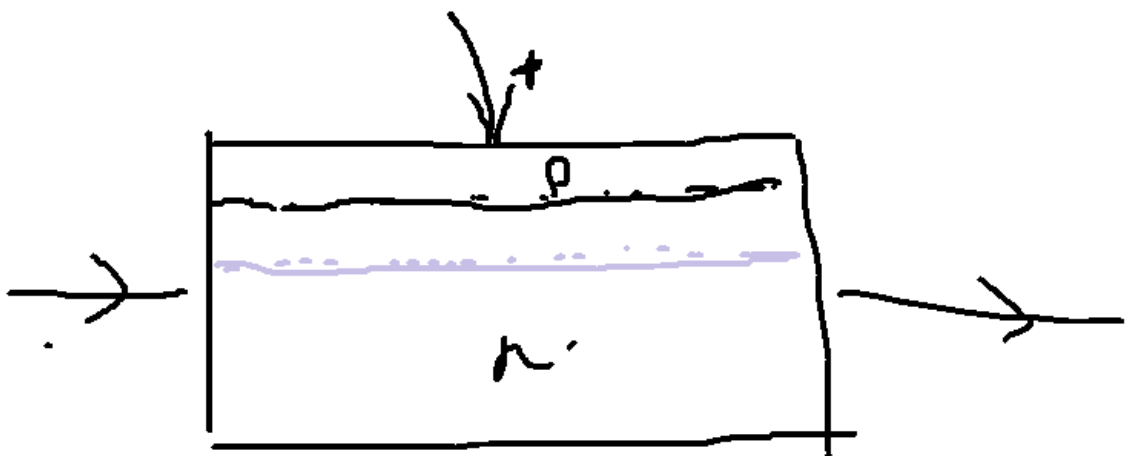
Это кристалл n-типа, с одной стороны которого внедрён небольшой кристалл p-типа.

В n-области избыток электронов, которые готовы переносить поле. Таким образом, проводимость пр-области (т.н. канала) гораздо больше проводимости p-области (затвора), через которую ток и не идёт практически.

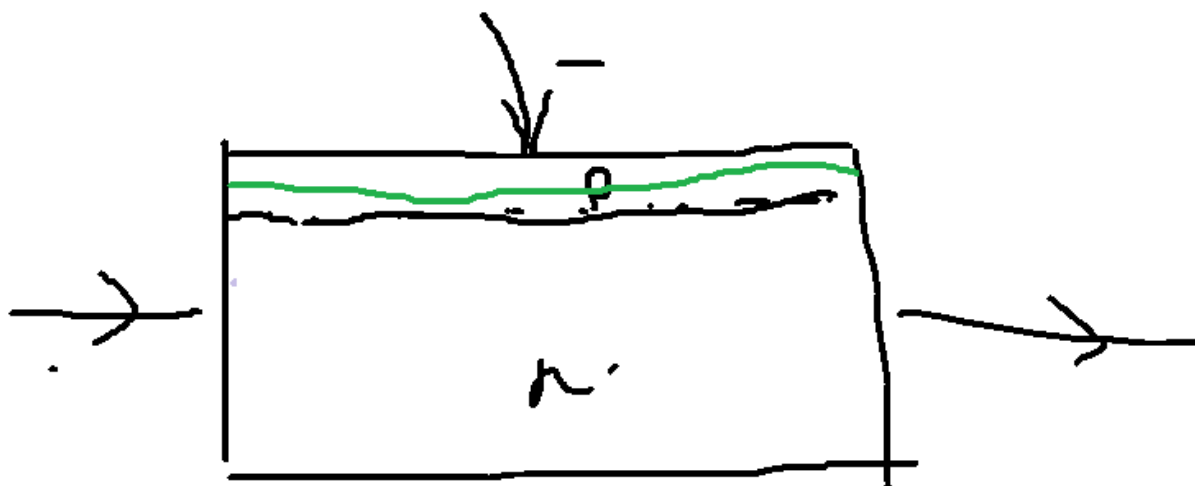
Если мы подадим на затвор напряжение, то возможны два варианта в зависимости от его полярности.

В любом случае граница p-n перехода изменится. Или она отодвинется от центра, или придвинется к центру.

Если мы на затвор докинем положительных зарядов, то им потребуется больше места. Граница p-n перехода сдвинется вниз, что приведёт к уменьшению площади сечения тока и увеличению сопротивления.



А если мы на p-кристалл докинем электронов, то граница съедет наверх, что приведёт к увеличению площади тока и уменьшения сечения.



Кстати, а как мы докидываем заряды на р-кристалл? Это можно делать двумя способами: током, как в предыдущем транзисторе, биполярном, и полем – транзистор же полевой! Распространённая ситуация: мы взяли полевой транзистор, изначально он ток проводит. После чего мы отсоединили транзистор не в цепь и подключили его к батарейке так, чтобы р-кристалл хорошо так зарядили положительными зарядами, чтобы граница р-п перехода сменилась максимально вниз. Ну как будто мы конденсатор заряжаем. После чего вернули уже заряженный транзистор в поле, где ток он уже проводить не будет.

Вятчанин, однако, на лекциях предпочитает по старинке регулировку током.

У вас наверняка возник вопрос: а как может в пространстве измениться граница р-п перехода? Она же чётко привязана к границе кристаллов. Вот кристалл р-типа, вот кристалл п-типа, там и граница р-п перехода.

Я писал эту методичку три дня, посмотрел кучу видеоуроков и кучу статей по полевым транзисторам. НИГДЕ НЕТ ответа на этот очевидный вопрос.

Граница меняется и перестаёт совпадать с границей кристаллов. А почему – объяснить не могу. Это уже вопрос к твёрдотельникам и кафедре физики полупроводников, а мы пользуемся их результатами.

Чтобы вы лучше осознали возможности для усиления сигнала, которые нам даёт полевой транзистор, прочитаем следующий абзац из лекций Вятчанина:

Сопротивление канала исток-сток порядка

$$R_{СИ} \approx 10^4 \text{ Ом.}$$

Для сравнения – сопротивление, где один из концов – затвор:

$$R_{ЗИ} = \frac{\partial U_{ЗИ}}{\partial I_3} \approx 10^8 \dots 10^{12} \text{ Ом.}$$

Гораздо больше. Я же говорил, что р-область очень плохо ток проводит.

Ну а далее начинается уже тема «усилители». В ней вводится коэффициент усиления. Вполне естественно

$$K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}.$$

И он, конечно, может зависеть от времени. Впрочем, частенько у нас ток синусоидальный. Тогда К от времени уже не зависит. Но зато становится комплексным:

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{U_{ВЫХ}(\omega)}{U_{ВХ}(\omega)}.$$