

Лекция 6

Тема: Пассивные и активные элементы полупроводниковых интегральных микросхем (Продолжение)

- 1) Многоэмиттерные и-р-и-транзисторы.
- 2) Многоколлекторные транзисторы.
- 3) Транзисторы с барьером шотки.
- 4) Супер-бета транзисторы.

РАЗНОВИДНОСТИ n - p - n -ТРАНЗИСТОРОВ

В процессе развития микроэлектроники появились некоторые разновидности n - p - n -транзисторов, не свойственные дискретным электронным схемам и не выпускаемые в виде дискретных приборов. Ниже рассматриваются наиболее важные из этих разновидностей.

МНОГОЭМИТТЕРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Структура многоэмиттерного транзистора (МЭТ) показана на рис. 46, *а*. Такие транзисторы составляют основу весьма распространенного класса цифровых ИС – так называемых схем ТТЛ. Количество эмиттеров может составлять 5-8 и более.

В первом приближении МЭТ можно рассматривать как совокупность отдельных транзисторов с соединенными базами и коллекторами (рис. 46, *б*). Особенности МЭТ как единой структуры следующие (рис. 46, *в*).

Во-первых, каждая пара смежных эмиттеров вместе с разделяющим их p -слоем базы образует горизонтальный (иногда говорят – продольный) транзистор типа n^+ - p - n^+ . Если на одном из эмиттеров действует прямое напряжение, а на другом обратное, то первый будет инжектировать электроны, а второй будет собирать те из них, которые инжектированы через боковую поверхность эмиттера и прошли без рекомбинации расстояние между эмиттерами. Такой транзисторный эффект является для МЭТ паразитным: в обратносмещенном переходе, который должен быть запертым, будет протекать ток. Чтобы избежать горизонтального

транзисторного эффекта, расстояние между эмиттерами, вообще говоря, должно превышать диффузионную длину носителей в базовом слое. Если транзистор легирован золотом, то диффузионная длина не превышает 2-3 мкм и практически оказывается достаточным расстояние 10-15 мкм.

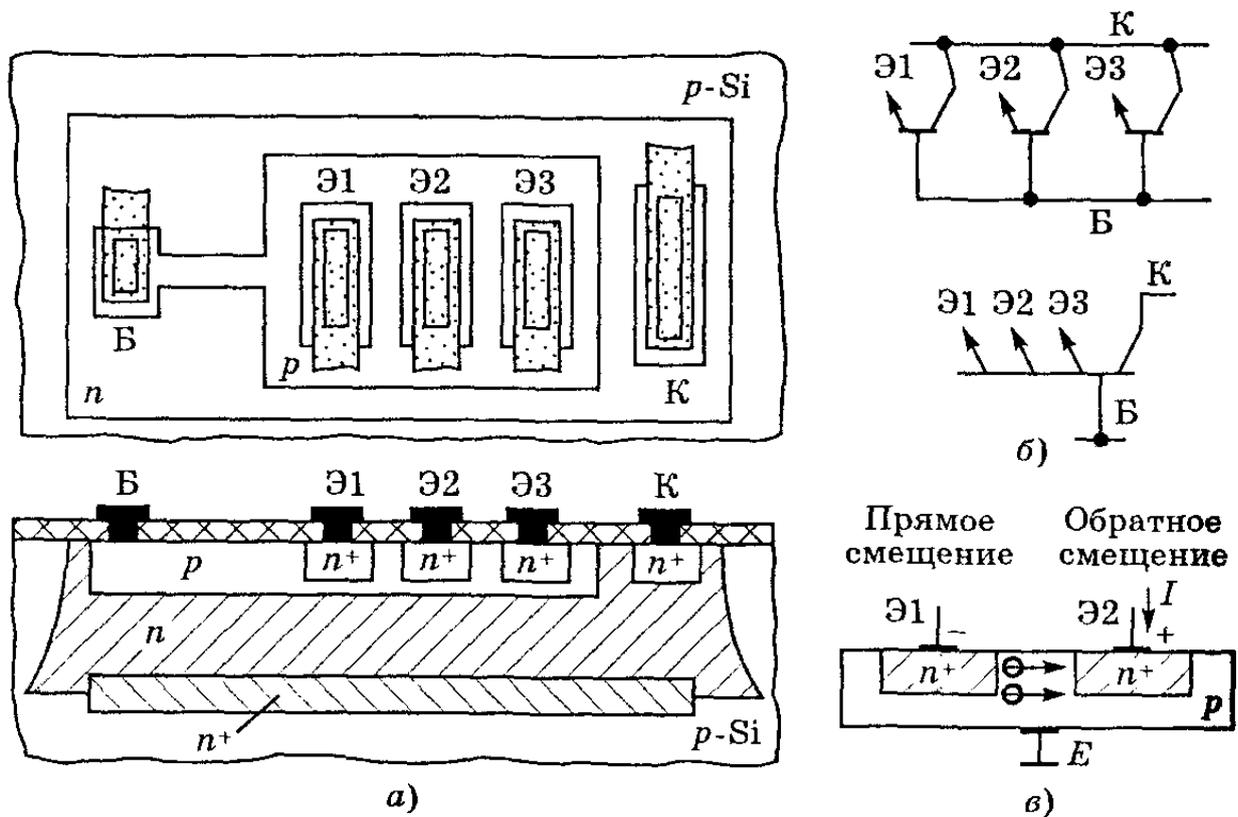


Рис. 46. Многоэмиттерный транзистор: *a* – топология и структура; *б* – схемные модели; *в* – взаимодействие между смежными эмиттерами

Во-вторых, важно, чтобы МЭТ имел как можно меньший инверсный коэффициент передачи тока. В противном случае в инверсном режиме, когда эмиттеры находятся под обратным напряжением, а коллектор под прямым, носители, инжектируемые коллектором, будут в значительной мере достигать эмиттеров, и в цепи последних, несмотря на их обратное смещение, будет протекать ток – паразитный эффект, аналогичный отмеченному выше.

Как известно, инверсный коэффициент передачи всегда меньше нормального из-за различий в степени легирования и в площадях эмиттера и коллектора. Чтобы дополнительно уменьшить инверсный коэффициент α_i в МЭТ, искусственно увеличивают сопротивление пассивной базы, удаляя омический базовый контакт от активной области транзистора (рис. 46, а). При такой конфигурации сопротивление узкого «перешейка» между активной областью и базовым контактом может составлять 200-300 Ом, а падение напряжения на нем от базового тока 0,1-0,15 В. Значит, прямое напряжение на коллекторном переходе (в инверсном режиме) будет в активной области на 0,1-0,15 В меньше, чем вблизи базового контакта. Соответственно инжекция электронов из коллектора в активную область базы будет незначительной и паразитные токи через эмиттеры будут практически отсутствовать.

МНОГОКОЛЛЕКТОРНЫЕ *n-p-n*-ТРАНЗИСТОРЫ

Структура многоколлекторного транзистора (МКТ), показанная на рис. 47, а, не отличается от структуры МЭТ. Различие состоит лишь в использовании структуры. Можно сказать, что МКТ – это МЭТ, используемый в инверсном режиме: общим эмиттером является эпитаксиальный *n*-слой, а коллекторами служат высоколегированные *n*⁺-слои малых размеров. Такое решение составляет основу одного из популярных классов цифровых ИС – так называемых схем инжекционной логики И²Л. Эквивалентная схема МКТ показана на рис. 47, б.

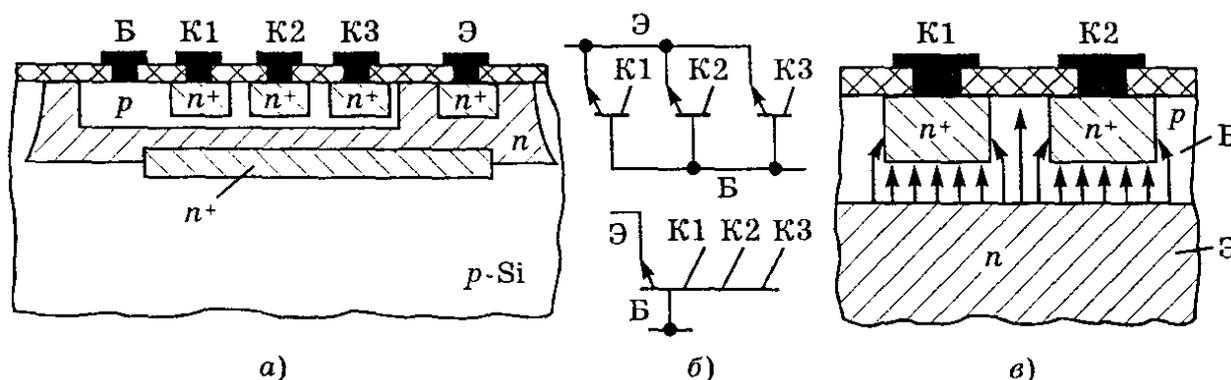


Рис. 47. Многоколлекторный транзистор: *a* – структура; *б* – схемные модели; *в* – траектория движения инжектированных носителей

Главной проблемой при разработке МКТ является увеличение нормального коэффициента передачи тока от общего n -эмиттера (инжектора) к каждому из n^+ -коллекторов. Естественно, что эта проблема – обратная той, которая решалась в случае МЭТ, когда коэффициент передачи от n -слоя к n^+ -слоям старались уменьшать.

В данном случае желательно, чтобы скрытый n^+ -слой располагался как можно ближе к базовому или просто контактировал с ним (как, например, при ИКД технологии). Тогда этот высоколегированный n^+ -слой, будучи эмиттером, обеспечит высокий коэффициент инжекции. Что касается коэффициента переноса, то для его повышения n^+ -коллекторы следует располагать как можно ближе друг к другу, сокращая тем самым площадь пассивной области базы. Оба эти пути, конечно, ограничены конструктивно–технологическими факторами. Тем не менее, даже при сравнительно разреженном расположении коллекторов, можно получить коэффициенты передачи на всю совокупность коллекторов $\alpha = 0,8-0,9$ или коэффициенты усиления $\beta = 4-10$. Этого достаточно для функционирования схем И²Л, если число коллекторов не превышает 3-51.

На рис. 47, в показаны траектории движения инжектированных носителей в базе. Как видим, носители двигаются так, что их доля, попадающая на коллекторы, существенно больше, чем если ее рассчитывать по формальному отношению площади коллектора к площади эмиттера. Именно поэтому реальный коэффициент β имеет те сравнительно большие значения, которые приведены выше. Следовательно, при расчете коэффициентов α и β нужно использовать не геометрические, а эффективные площади.

Из рис. 47, в видно также, что средняя длина траектории носителей значительно превышает толщину активной базы w . Поэтому среднее время диффузии будет значительно меньше, чем у МЭТ и отдельных транзисторов. Разница во временах пролета еще больше, поскольку в МКТ поле базы для инжектированных носителей является не ускоряющим, а тормозящим. Время пролета $t_{пр}$ составляет не менее 5-10 нс, а соответствующая предельная частота f_T – не более 20-50 МГц.

С другой стороны, коллекторная емкость C_k у МКТ значительно меньше, чем у МЭТ и обычных транзисторов, из-за малой площади n^+ -коллектора. Поэтому членами $C_k R_k$ и $C^* R_k$ часто можно пренебречь.

ТРАНЗИСТОР С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

На рис. 48 показана структура интегрального ТШ. Здесь очень изящно решена задача сочетания транзистора с диодом Шоттки: алюминиевая металлизация, обеспечивающая омический контакт с p -слоем базы, проделана в сторону коллекторного n -слоя. На первый взгляд, коллекторный слой оказался закороченным со слоем базы. На самом же деле алюминиевая полоска образует с p -слоем базы невыпрямляющий, омический контакт, а с n -слоем коллектора выпрямляющий контакт Шоттки.

Разумеется, структурное решение, показанное на рис. 48, можно использовать не только в простейшем транзисторе, но и в МЭТ. В обоих случаях отсутствуют накопление и рассасывание избыточных зарядов и получается существенный (в 1,5-2 раза) выигрыш во времени переключения транзисторов из полностью открытого в запертое состояние.

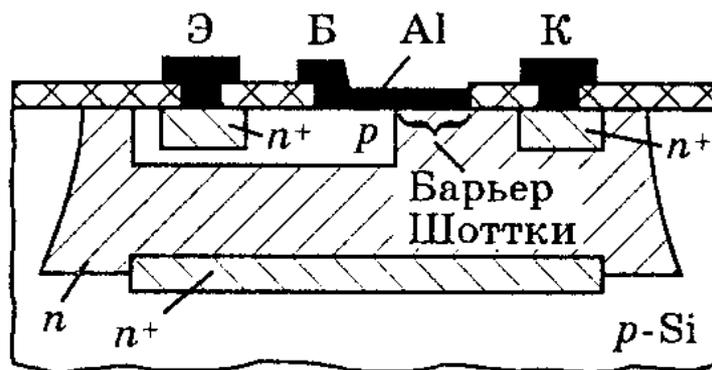


Рис. 48. Интегральный транзистор с барьером Шоттки

СУПЕРБЕТА ТРАНЗИСТОР

Это название присвоено транзисторам со сверхтонкой базой: $w = 0,2-0,3$ мкм. При такой ширине базы коэффициент усиления базового тока составляет $\beta = 3000-5000$ и более, откуда и следует их название.

Получение сверхтонкой базы представляет серьезную технологическую проблему. Во-первых, ширина базы есть разность глубин базового и эмиттерного слоев: $w = d_6 - d_3$. Если допуск на ширину базы составляет $\pm 10\%$, т.е. $0,02$ мкм, то при глубине базового слоя $d_6 = 2$ мкм глубина эмиттерного слоя должна составлять $d_3 = 1,8 \pm 0,02$ мкм. Значит, эмиттерная диффузия должна осуществляться с допуском $\pm 1,25\%$, что лежит на пределе технологических возможностей. Во-вторых, когда в процессе диффузии эмиттерного слоя его металлургическая граница приближается к металлургической границе коллекторного слоя на расстояние $0,4$ мкм, наступает так называемый эффект оттеснения коллекторного перехода: дальнейшая диффузия атомов фосфора в эмиттерном слое сопровождается диффузией (с той же скоростью) атомов бора в базовом слое. Можно сказать, что эмиттерный слой «продавливает» металлургическую границу ранее полученного базового слоя (рис. 49). При этом толщина базы сохраняет значение около $0,4$ мкм. Для того, чтобы преодолеть отмеченные трудности и обеспечить воспроизводимость ширины базы, потребовались многолетние усилия физиков–технологов. Большой коэффициент усиления у супербета транзисторов покупается ценой очень малого пробивного напряжения ($1,5-2$ В). Это – результат эффекта смыкания переходов, свойственного транзисторам с тонкой базой. Поэтому супербета транзисторы являются не универсальными, а специализированными элементами ИС. Их главная область применения – входные каскады операционных усилителей.

Необходимо заметить, что дальнейшее уменьшение ширины базы до $0,1$ мкм и менее связано уже не столько с технологическими, сколько с принципиальными физическими проблемами. А именно, если принять среднюю концентрацию акцепторов в базе равной $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (рис. 42), то на 1 см длины их приходится $2 \cdot 10^5$. При ширине базы $0,1$ мкм (т.е. 10^{-5} см)

оказывается, что в базе располагаются всего два слоя акцепторных атомов. При этом теряет смысл понятие градиента концентрации примеси (и связанное с ним понятие внутреннего поля), качественно меняются процессы рассеяния и характер движения носителей в базе. Тем самым классическая теория транзисторов в значительной мере теряет силу.

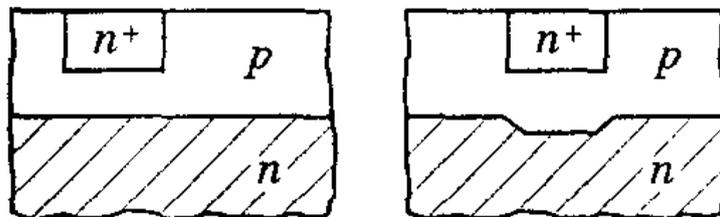


Рис. 49. Иллюстрация проблемы получения сверхтонкой базы