

1.4. ДИОДНО-ТРАНЗИСТОРНАЯ ЛОГИКА

1.4.1. СХЕМА БАЗОВОГО ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ДТЛ

На рис. 1.11 приведена схема базового логического элемента ДТЛ, а на рис. 1.13 показана его статическая передаточная характеристика. ДТЛ, как и РТЛ, относится к классу насыщенных логических схем: выходной транзистор $VT1$ ЛЭ работает или в режиме отсечки или в режиме насыщения. Рассасывание заряда в базе происходит через резистор $R2$. В случае его отсутствия рассасывание заряда в базе было бы долгим, а быстродействие ЛЭ плохим.

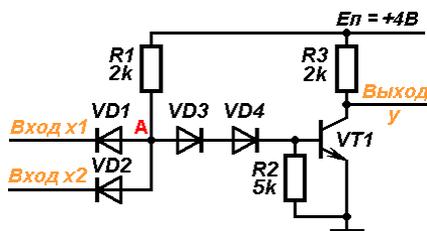


Рис. 1.11. Базовый ЛЭ ДТЛ

Работа схемы. Если хотя бы на одном из входов присутствует низкий уровень входного сигнала, то ток от источника питания E_n через резистор $R1$ и диод $VD1$ или $VD2$ течёт в коллектор насыщенного транзистора предыдущей схемы (к входу подключен такой же ЛЭ).

В этом случае $U_A = U_{VD3} + U_{KЭ\text{нас}VT1} \approx 0,7 + 0,4 = 1,1$ В. Диоды реализуются следующим образом – рис. 1.12.

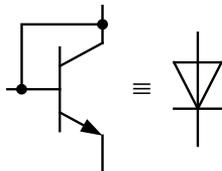


Рис. 1.12. Вариант реализации диода в интегральных схемах

В случае присутствия на входе сигнала уровня логического нуля для открытия транзистора $VT1$ необходимо, чтобы:

$$U_A = U_{VD3} + U_{VD4} + U_{VT1} = 0,7 \text{ В} + 0,7 \text{ В} + 0,7 \text{ В} = 2,1 \text{ В}.$$

Следовательно, транзистор $VT1$ закрыт, через резистор $R3$ ток не протекает, падения напряжения на нем нет, поэтому на выходе схемы устанавливается уровень логической «1».

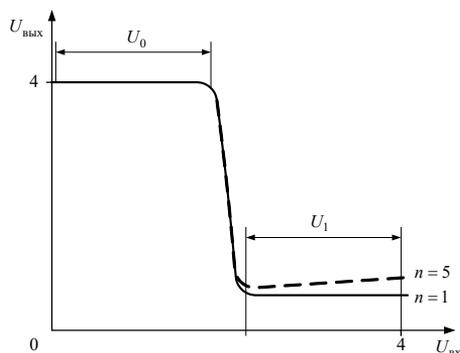


Рис. 1.13. Статическая передаточная характеристика ЛЭ ДТЛ

Если на обоих входах ЛЭ присутствует высокий уровень логического сигнала, то диоды $VD1$ и $VD2$ закрываются. В этом случае ток, протекающий через резистор $R1$, течёт уже через диоды $VD3$ и $VD4$ и частично через $R2$ (небольшая часть, так как сопротивление $R2$ велико), и далее в базу транзистора $VT1$, который открывается и переходит в режим насыщения. Его коллекторный ток, протекающий через резистор $R3$, приведёт к падению на нем напряжения и низкому уровню выходного сигнала $U_0 \approx U_{KЭ \text{ нас}} = 0,3 \div 0,4 \text{ В}$.

ЛЭ ДТЛ реализует логическую функцию «И–НЕ». В этой схеме, в отличие от РТЛ, размах логического сигнала практически не зависит от количества схем в нагрузке. Схема обладает высоким значением коэффициента разветвления по выходу. Но каждая новая подключаемая схема – это дополнительная ёмкость. Следовательно, с ростом числа нагрузочных схем динамические характеристики такого ЛЭ ухудшаются.

Чтобы определить точку перегиба СПХ ЛЭ ДТЛ, надо определить напряжение на его входе, при котором открывается транзистор $VT1$ (в момент его открытия диод $VD1$ ещё открыт):

$$\begin{aligned} U_{\text{п}} &= U_{VD3} + U_{VD4} + U_{VT1} - U_{VD1} = \\ &= 0,7 \text{ В} + 0,7 \text{ В} + 0,7 \text{ В} - 0,7 \text{ В} = 1,4 \text{ В}. \end{aligned}$$

Из-за наличия у транзистора $VT1$ сопротивления тела коллектора, с увеличением числа нагрузочных схем N СПХ в зоне уровня логического нуля на выходе немного поднимается.

Точку перегиба СПХ можно сдвинуть вправо на $0,7 \text{ В}$, добавив еще диод в цепь диодов $VD3$ и $VD4$.

Схемы ДТЛ выпускались в начале и середине 60-х годов. В настоящее время выпускаются схемы ДТЛ, имеющие большой запас помехоустойчивости. Эти схемы будут рассмотрены далее.

1.4.2. НЕДОСТАТКИ СХЕМЫ

1. Высокоомный резистор $R2$ занимает большую площадь кристалла, поскольку его формировали методом диффузии (ионной имплантации тогда еще не было), с помощью которого получить области с высоким значением поверхностного сопротивления было затруднительным.
2. Схема имеет высокое выходное сопротивление и, как следствие этого, большие времена перехода из одного состояния в другое.

Модернизация схемы ДТЛ с целью увеличения быстродействия – применение схемы так называемого «сложного инвертора» (рис. 1.14).

Резистор $R7$ ограничивает ток, протекающий через транзисторы $VT4$ и $VT5$. Резистор $R6$ нужен для того, чтобы увеличить ток базы транзистора $VT3$. Без этого резистора ток базы $VT3$ сравним с токами утечки, что в случае отклонений в технологическом процессе производства ИМС приведет к неработоспособности схемы.

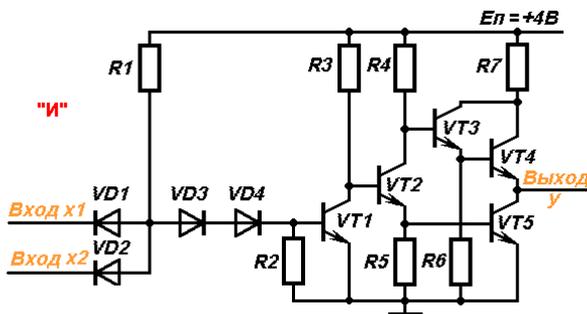


Рис. 1.14. Принципиальная схема ЛЭ ДТЛ со сложным инвертором, реализующая логическую функцию «2И»

Когда на выходе ЛЭ – уровень логического «0», транзистор $VT5$ находится в режиме насыщения. Следовательно, есть ток базы $VT5$. Для этого необходимо падение напряжения на резисторе $R5$. Это возможно лишь при открытом транзисторе $VT2$. Если он открыт, то есть падение напряжения на резисторе $R4$, и напряжения на базе транзистора $VT3$ недостаточно, чтобы открыть пару транзисторов $VT3$ и $VT4$. Через резистор $R3$ протекает ток базы $VT2$, что возможно лишь при закрытом транзисторе $VT1$. А это возможно только тогда, когда хотя бы на одном из входов ЛЭ присутствует уровень логического «0». Таким образом, рассмотренная схема реализует логическую функцию «И».

1.4.3. СХЕМА ДТЛ С УВЕЛИЧЕННЫМ ЗАПАСОМ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

На рис. 1.15 приведен вариант схемы ДТЛ с усовершенствованной входной цепью.

Транзистор $VT1$ нужен для обеспечения протекания малых токов во входной цепи. При логическом «0» на входе он работает как эмиттерный повторитель. Кроме того, его наличие повышает помехоустойчивость ЛЭ за счёт падения напряжения ещё на одном $p-n$ -переходе. Большая часть тока, протекающего через резистор $R1$, уходит в его коллекторную цепь, а меньшая часть протекает через резистор $R2$ и уходит в предыдущую схему.

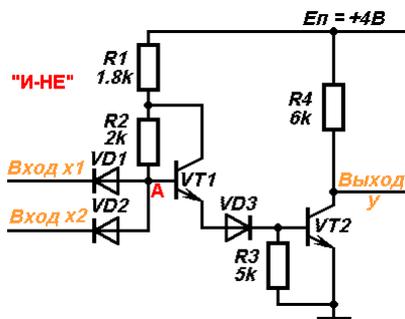


Рис. 1.15. Усовершенствованный логический элемент ДТЛ с уменьшенным входным током

Данный тип элементов (рис. 1.16) применяют в схемах промышленной автоматики (управление станками с числовым программным управлением).

В этой схеме чтобы сэкономить площадь кристалла, цепочку диодов смещения заменили стабилитроном, работающим в режиме пробоя. Транзистор $VT2$ должен быть рассчитан на протекание достаточно больших токов, так как сопротивление резистора $R3$ всего 5 кОм. Транзистор $VT3$ открывается, только если транзистор $VT2$ закрыт. Диод $VD3$ – дополнительный диод, который пропускает ток при закрытом транзисторе $VT3$. Для такой схемы статическая передаточная характеристика – рис. 1.17.

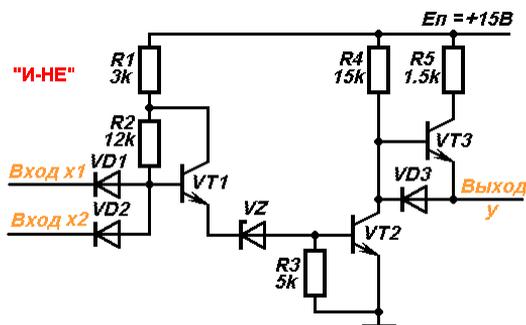


Рис. 1.16. Логический элемент ДТЛ с повышенной помехоустойчивостью

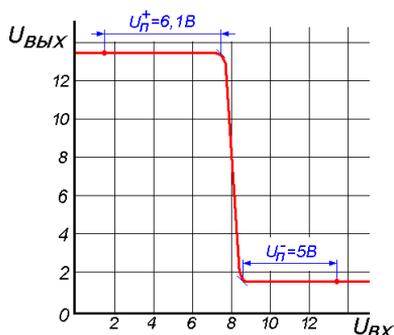


Рис. 1.17. Статическая передаточная характеристика ЛЭ ДТЛ с увеличенным запасом статической помехоустойчивости

Общие недостатки базовых логических элементов ДТЛ

1. Большие номиналы резисторов.
2. Диодная сборка занимает большую площадь кристалла.
3. Наличие паразитных ёмкостей в цепочке диодов смещения (снижается быстродействие).

Стабилитрон улучшает температурные характеристики схемы, но является источником шума. Однако в цифровой схемотехнике это практически никак не сказывается на работе ЛЭ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛЕКЦИИ 4

Вопрос 1. В чем заключается усовершенствование ЛЭ ДТЛ на рис. 1.15?

Ответы:

1. На рис.1.15 входной резистор R1 (рис. 1-11) разделен на два – R1 и R2. Суммарное сопротивление этих резисторов больше, а потому входной ток ЛЭ – меньше. Поэтому такой ЛЭ имеет большее значение коэффициента объединения и к его входам можно подключить большее число ЛЭ.

2. На схеме рис.1.15 у транзистора VT1 напряжение на коллекторе всегда выше напряжения на базе, поэтому он никогда не может попасть в режим насыщения. Быстродействие такого ЛЭ – выше.

Вопрос 2. Какими достоинствами и недостатками обладают ЛЭ ДТЛ?

Ответы:

1. Основное достоинство – практическая независимость уровней логических сигналов от числа нагрузочных ЛЭ. Основной недостаток – входная диодная сборка занимает на кристалле ЛЭ большую площадь.

2. Размах уровней логических сигналов практически равен напряжению питания

3. Сопротивление резистора, подключенного между эмиттером и базой выходного транзистора имеет большую величину, а сам резистор занимает на кристалле большую площадь.

Вопрос 3. Какую функцию выполняют диоды VD3 и VD4 в схеме ЛЭ ДТЛ на рис. 1.11?

Ответы:

1. Изменяют статический режим работы ЛЭ.

2. Обеспечивают запасы статической помехоустойчивости ЛЭ.

3. Увеличивают быстродействие ЛЭ.

Вопрос 4. Какую функцию выполняет резистор R2 в схеме ЛЭ ДТЛ на рис. 1.11?

Ответы:

1. Обеспечивает быстрый разряд избыточного заряда дырок в базе транзистора VT1 и вывод его из режима насыщения, увеличивая быстродействие ЛЭ.

2. Уменьшает степень насыщения транзистора VT1 за счет отвода части его базового тока.

3. Изменяет статический режим работы транзистора VT1

1.5. ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНАЯ ЛОГИКА

Цель лекции: ознакомление с транзисторно-транзисторной логикой.

1.5.1. СХЕМА БАЗОВОГО ЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ТТЛ

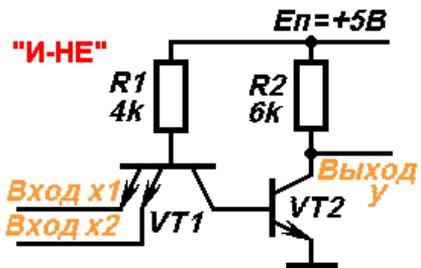
В схемах транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) с целью улучшения электрических параметров (увеличения быстродействия, уменьшения мощности рассеяния) и повышения плотности размещения элементов на кристалле входная матрица диодов заменена многоэмиттерным транзистором. Принципиальная схема простого базового логического элемента ТТЛ показана на рис. 1.18.

На рис. 1.19 приведена топология кристалла микросхемы SN7420, в котором реализованы два 4-х входовых логических элемента, каждый из которых имеет принципиальную схему, представленную на рис. 1.18.

Работа схемы. Если хотя бы на одном из ее входов присутствует низкий уровень логического сигнала, то ток от источника питания протекает через резистор $R1$ и далее через соответствующий открытый переход база–эмиттер многоэмиттерного транзистора $VT1$ втекает в коллектор транзистора $VT2$ предыдущего ЛЭ. Переход база–коллектор транзистора $VT1$ закрыт, поэтому тока в базу транзистора $VT2$ нет, и он находится в режиме отсечки. Поэтому нет падения напряжения на резисторе $R2$, и на выходе ЛЭ устанавливается высокий уровень логического сигнала. Отметим, что в этом случае транзистор $VT1$ работает в активном режиме.

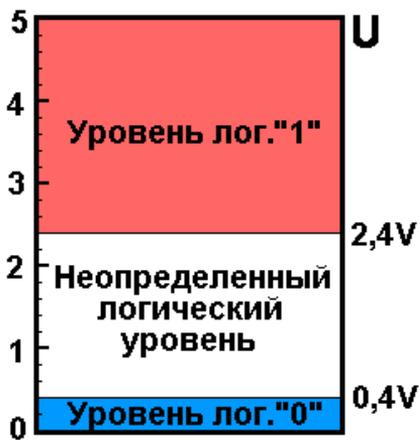
Если же на обоих входах схемы присутствует высокий уровень логического сигнала, то все переходы база–эмиттер многоэмиттерного транзистора $VT1$ закрыты, а переход база–коллектор – открыт. Поэтому ток от источника питания через резистор $R1$ течёт уже в базу транзистора $VT2$, вызывая его переход из режима отсечки в активный режим и далее в режим насыщения. В этом случае его коллекторный ток протекает через резистор $R2$, и на нем есть падение напряжения. Поэтому на выходе схемы устанавливается низкий уровень логического сигнала. Транзистор $VT1$ в этом случае работает в инверсном активном режиме.

В рассматриваемой схеме сопротивление резистора $R2$ должен быть достаточно большим (3–6 кОм), чтобы гарантировать попадание транзистора $VT2$ в режим насыщения при наилучшем сочетании параметров.



x_2	x_1	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

б



в

Рис. 1.18. Принципиальная схема простого ЛЭ ТТЛ (а), таблица истинности его работы (б) и принятые в ТТЛ уровни логических сигналов (в)

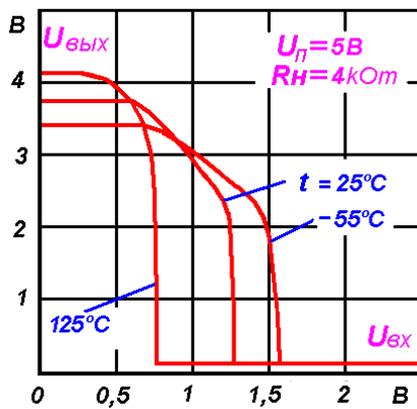
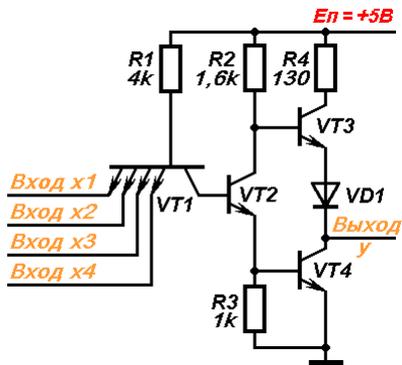


Рис. 1.19. Базовый логический элемент ТТЛ со сложным инвертором и его статическая передаточная характеристика

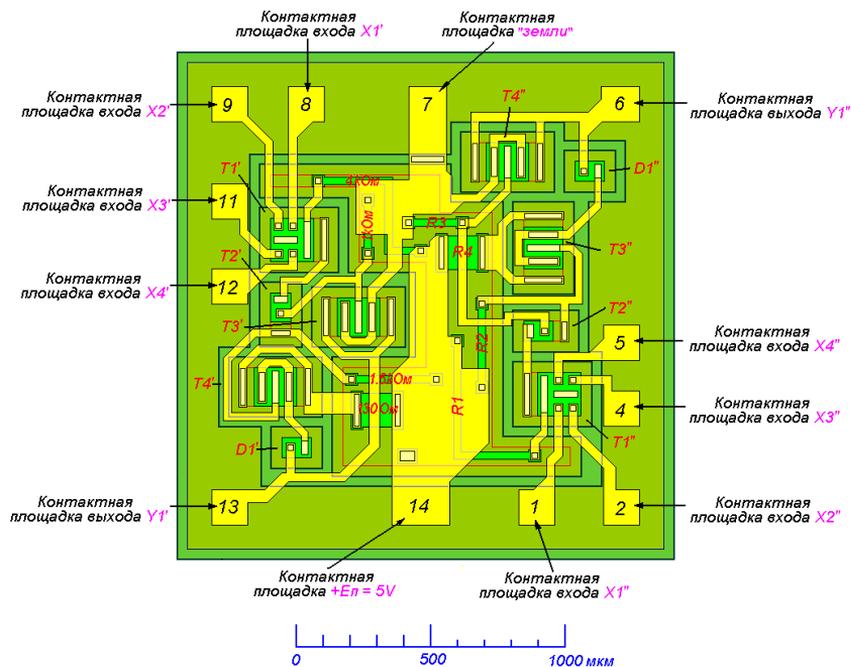


Рис. 1.20. Топология кристалла микросхемы K155JA1 (зарубежный аналог - микросхема SN7420)

Рассмотренная схема имеет большое выходное сопротивление, а потому медленно переключается из одного состояния в другое. С целью снижения выходного сопротивления ЛЭ и улучшения его функциональных параметров введена схема сложного инвертора. В результате ЛЭ имеет схему, показанную на рис. 1.19. Схема содержит три каскада: входной (транзистор $VT1$ и резистор $R1$), фазорасщепительный (транзистор $VT2$, резисторы $R2$ и $R3$) и выходной (транзисторы $VT3$, $VT4$, $VT5$ и токоограничительный резистор $R4$).

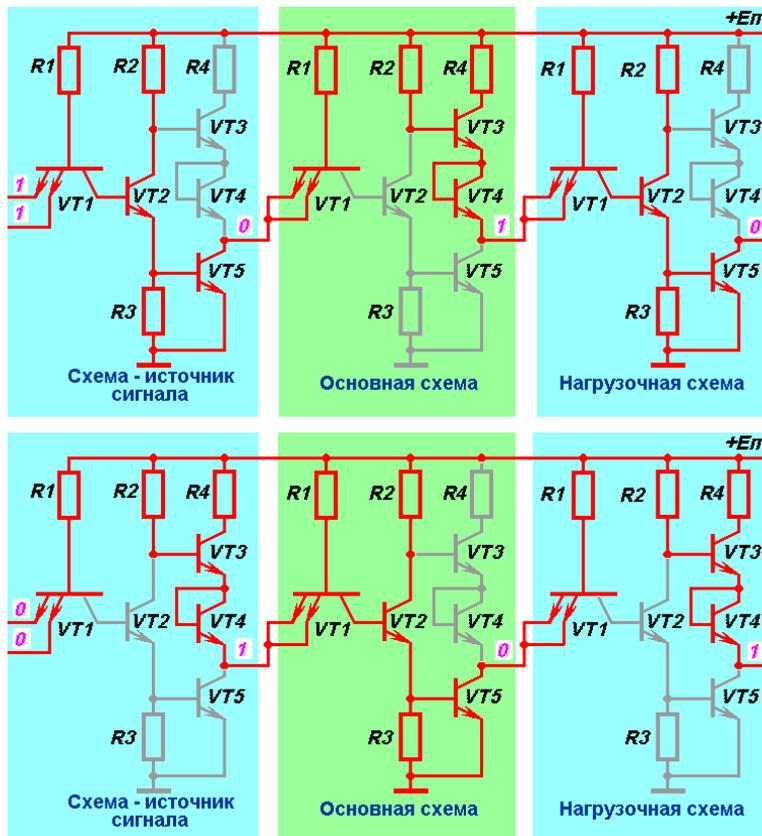


Рис. 1.21. Работа базового ЛЭ ТТЛ при уровнях логической «1» (а) и логического «0» (б) на входе основной схемы

Работу этого ЛЭ при различных уровнях входного сигнала иллюстрирует рис.1.20. Для ЛЭ ТТЛ принята шкала уровней логического сигнала, показанная на рис.1.18, в.

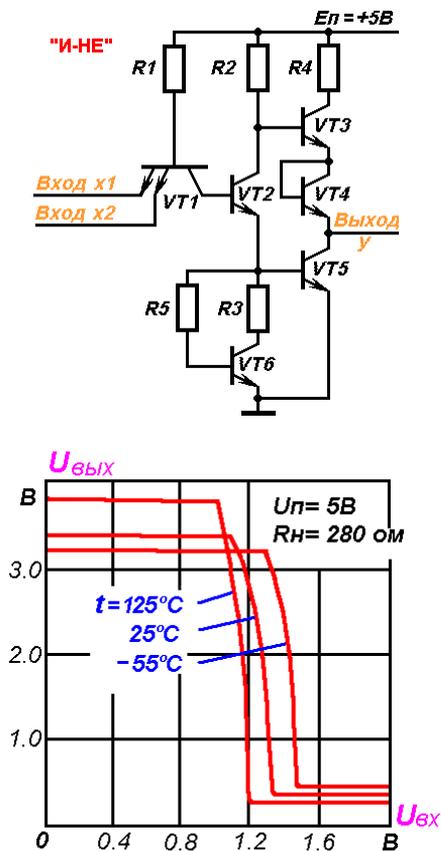


Рис. 1.22. Принципиальная схема базового логического элемента ТТЛ (а) с улучшенной формой статической передаточной характеристики (б)

Работу этого ЛЭ при различных уровнях входного сигнала иллюстрирует рис. 1.21. Для ЛЭ ТТЛ принята шкала уровней логического сигнала, показанная на рис. 1.18, в.

1.5.2. РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТТЛ

На рис. 1.21 показана принципиальная схема универсального базового ЛЭ ТТЛ. Такие элементы выпускались как самостоятельные изделия и служили для построения других, более сложных приборов.

В этом ЛЭ узел $VT6$, $R3$, $R5$ служит для улучшения формы статической передаточной характеристики. При первом рассмотрении он может быть представлен как резистор с сопротивлением 1 кОм .

Иногда на вход такой схемы между входом и общей землей ставят так называемые защитные диоды. При нормальном использовании ЛЭ эти дио-

ды смещены в обратном направлении, имеют очень большое сопротивление и не влияют на его работу.

Когда один или несколько входов соединены с общей шиной – непосредственно или через выходной транзистор предыдущего каскада, соответствующий эмиттерный переход транзистора $VT1$ окажется смещенным в прямом направлении, поскольку потенциал базы выше потенциала эмиттера.

На рис. 1.22 приведена схема микромощного базового логического элемента ТТЛ.

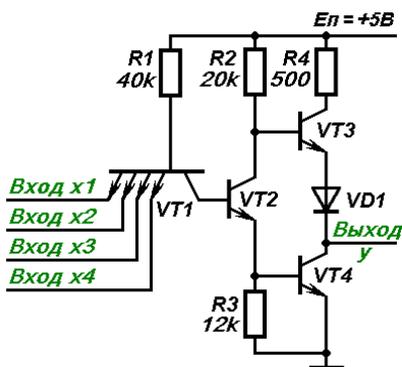


Рис. 1.23. Принципиальная схема микромощного логического элемента ТТЛ

Отличие в основном состоит в номиналах резисторов. Поскольку сопротивления тут достаточно велики, то величина протекающих в цепях схемы токов – мала. Поэтому мощность, рассеиваемая на каждом транзисторе микросхемы, также мала.

С увеличением сопротивлений быстродействие схемы падает, однако медленнее, чем увеличиваются номиналы резисторов. Объясняется это тем, что транзисторы с малой мощностью рассеяния делают меньших размеров, а значит, с меньшими паразитными ёмкостями. Микромощные элементы ТТЛ рассеивают примерно в десять раз меньшую мощность по сравнению с входными элементами универсальных серий и уступают им по быстродействию примерно в три-пять раз. Эти микросхемы характеризуются меньшей работой переключения.

Микросхемы таких серий допускают непосредственное сопряжение по входам и выходам с микросхемами универсальных серий, а также с КМДП-структурами в случае питания последних от +5 В. Благодаря тому, что в составе микросхем имеются функциональные узлы СИС, которых нет среди изделий других серий ТТЛ и КМДП, арсенал технических средств разработчика аппаратуры приборостроения увеличивается.

1.5.3 МИКРОСХЕМЫ ТТЛ ПОВЫШЕННОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Быстродействие микросхем ТТЛ можно повысить двумя способами: 1) уменьшая сопротивление резисторов и паразитные ёмкости; 2) предотвращая насыщение транзисторов схемы, а следовательно, и накопление носителей зарядов в их базах. Оба способа нашли практическое воплощение.

Микросхемы первого вида имеют задержку распространения 12 нс на элемент при мощности потребления 23 мВт. Базовый ЛЭ такой микросхемы (рис. 1.23) в принципе не отличается от аналогичных элементов других серий ТТЛ. Выходной каскад с парой совмещенных транзисторов (схема Дарлингтона) обладает меньшим выходным сопротивлением, что повышает его быстродействие. Схемы этого типа способны работать с тактовой частотой до 50 МГц.

Второй путь повышения быстродействия микросхем ТТЛ – более результативный и перспективный был связан с применением транзисторов с барьером Шоттки.

Микросхемы этого вида среди других изделий ТТЛ имеют максимальное быстродействие, которое сочетается с умеренным потреблением мощности. Эти качества достигаются за счет введения в схему структур металл – слабо легированный полупроводник, обладающих выпрямляющими свойствами (диодов с барьером Шоттки, или, короче, диодов Шоттки).

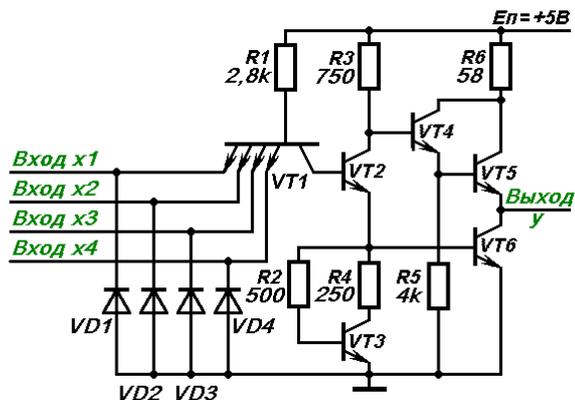


Рис. 1.24. Принципиальная схема базового элемента ТТЛ повышенного быстродействия

По принципу действия диоды Шоттки существенно отличаются от диодов, работа которых основана на свойствах электронно-дырочного $p-n$ -перехода. В $p-n$ -переходе, смещенном в прямом направлении, перенос тока обусловлен инжекцией неосновных носителей из одной области полупроводника в другую. Вследствие этого после переключения приложенного напряжения с прямого на обратное ток еще протекает некоторое время, пока избыточная концентрация неосновных носителей не снизится до нуля (вре-

мя рассасывания). В диоде Шоттки накопления неосновных носителей не происходит, так как перенос тока в нем обусловлен переходом (эмиссией) основных носителей из полупроводника в металл. Благодаря этому их время выключения очень мало (до 100 пикосекунд) и не зависит от температуры, в то время как для $p-n$ -переходов оно составляет 1–100 нс.

Другое достоинство диодов Шоттки состоит в том, что для их отпирания требуется напряжение 0,2–0,4 В против 0,6–0,7 В для диодов с $p-n$ -переходом и может регулироваться подбором металла, образующего контакт с полупроводником.

В обычных микросхемах ТТЛ открытые транзисторы находятся в состоянии насыщения, при котором эмиттерный и коллекторный переходы смещены в прямом направлении и инжектируют носители в базу. Это создает избыточное количество неосновных носителей в базовой и коллекторной областях, которые, как и в случае одиночного перехода, удлиняют процесс выключения транзистора. Диоды Шоттки подключаются параллельно коллекторному переходу транзистора и придают ему ряд новых качеств (рис. 1.25). Диоды Шоттки формируются на общем кристалле одновременно с остальными элементами микросхемы в едином технологическом процессе. Транзисторы с диодами Шоттки часто называют транзисторами с барьером Шоттки или просто транзисторами Шоттки.

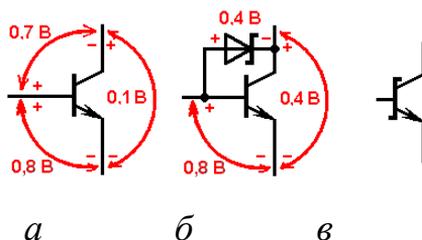


Рис. 1.25. Обеспечение ненасыщенного режима биполярного транзистора:

а – распределение напряжения в насыщенном транзисторе; *б* – биполярный транзистор с диодом Шоттки; *в* – условное изображение транзистора Шоттки

Когда транзистор заперт или находится в ненасыщенном режиме, потенциал коллектора выше потенциала базы, а значит, диод смещен в обратном направлении и не влияет на работу транзистора. Если в процессе отпирания транзисторов потенциал коллектора становится ниже потенциала базы, диод Шоттки открывается и на нем устанавливается прямое напряжение U_d^+ . Поскольку это напряжение меньше 0,5 В, то переход база-коллектор практически заперт, а, следовательно, не возникает режима насыщения и связанных с ним двойной инжекции и накопления избыточного заряда в базе. Благодаря этому при запираании транзистора существенно сокращается время задержки, необходимое для его рассасывания.

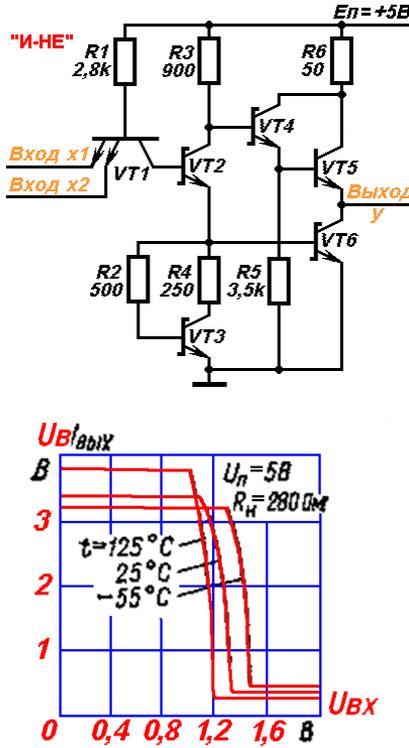


Рис. 1.26. Принципиальная схема базового элемента ТТЛШ и его статическая передаточная характеристика

На рис. 1.25 указаны напряжения на электродах транзистора. Остаточное напряжение на коллекторе транзистора Шоттки составляет 0,2–0,4 В, т.е. немного больше, чем на обычном насыщенном транзисторе. На рис. 1.26 показаны принципиальная схема и передаточные характеристики логического элемента ТТЛШ.

В микросхемах ТТЛ с диодами Шоттки, как и в универсальных сериях ТТЛ, переключения сопровождаются бросками тока в цепи питания; потребляемая мощность быстро растет с частотой переключений. Если в статическом режиме микросхема ТТЛШ потребляет практически такую же мощность, как и аналогичный прибор универсальных серий ТТЛ, то при частоте переключений 50 МГц рассеиваемая мощность удваивается, а при 100 МГц – утраивается.

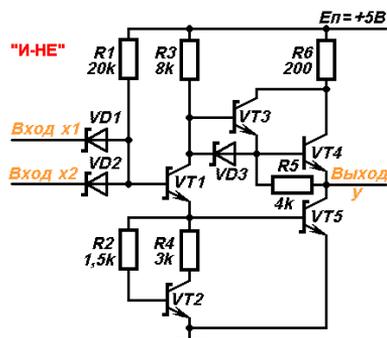


Рис. 1.27. Принципиальная схема базового ЛЭ маломощных микросхем ТТЛШ и их статическая передаточная характеристика

В маломощных микросхемах ТТЛ с диодами Шоттки (рис. 1.27) сочетаются высокое быстродействие с умеренным потреблением мощности. При одинаковом с универсальным элементом ТТЛ быстродействию потребляемая здесь мощность в пять раз меньше.

В целом схема повторяет рассмотренные ранее схемы элементов ТТЛ, но отличается от них тем, что на входе вместо многоэмиттерного транзистора стоят диоды Шоттки, благодаря чему свободные входы могут непосредственно подключаться к шине питания. Допустимые помехи для этих серий немного меньше, ввиду того что между базой входного транзистора и землей находятся два $p-n$ -перехода, а не три, как у микросхем ТТЛ других серий.

И еще один важный момент. Суммарная мощность, рассеиваемая микросхемой, ограничена некоторой предельной величиной, определяемой типом используемого корпуса. Так, для пластмассового корпуса с 14 выводами максимальная мощность составляет 0,5 Вт, что накладывает существенные ограничения на ее функциональную сложность. По этой причине обычные ТТЛ-схемы, а также схемы ТТЛШ не подходят для создания БИС. Поскольку маломощные микросхемы с диодами Шоттки потребляют примерно в 5 раз меньшую мощность, то на одном кристалле можно разместить в 5 раз больше транзисторов и других элементов без превышения норм перегрева.

Сравнительно с другими сериями семейства ТТЛ маломощные микросхемы ТТЛШ наиболее привлекательны для использования в аппаратуре приборостроения, работающей с высокой производительностью.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЛЕКЦИИ 5

Вопрос 1	Что такое диод Шоттки? Какова его структура?
Ответы:	
1	Это область контакта между слабо легированным полупроводником и металлом.
2	Это <i>p-n</i> -переход между металлом и полупроводником.
3	Это диод, подключенный параллельно областям базы и коллектора транзистора.
Вопрос 2	В чем заключаются преимущества ЛЭ ТТЛШ перед обычными ЛЭ ТТЛ?
Ответы:	
1.	Диоды Шоттки являются практически безинерционными элементами, поэтому используя их можно получить ЛЭ с большим быстродействием. Будучи подключенными параллельно <i>p-n</i> -переходу между базой и коллектором транзистора они за счет другой ВАХ уменьшают степень насыщения транзистора, что также способствует повышению быстродействия ЛЭ.
2.	По сравнению с ЛЭ ТТЛ, ЛЭ ТТЛШ имеют большие запасы статической помехоустойчивости.
3.	ЛЭ ТТЛШ, по сравнению с ЛЭ ТТЛ имеют большую потребляемую мощность.