

Знакомьтесь: транзистор биполярный — интегральный

Ознакомившись в предыдущих статьях [1] со свойствами биполярных транзисторов в корпусном исполнении, читатель, очевидно, понял, что рационально проектировать схемы различных устройств непросто. Однако современные аналоговые микросхемы содержат многие десятки и сотни транзисторов и возникает вопрос: как же их проектировать? Как учесть многие факторы: конструктивные, технологические, схемотехнические и эксплуатационные? Попробуем немного приоткрыть завесу этой тайны и рассказать о свойствах интегральных транзисторов и некоторых особенностях схемотехники аналоговых интегральных схем.

С появлением интегральной технологии многие традиционные методы и принципы проектирования электронных устройств оказались неэффективными и неприемлемыми. Особенно это проявилось в области аналоговых электронных схем, где разработчик сталкивается с целым рядом ограничений и вынужден применять новые способы проектирования.

Интегральными называются устройства, изготовление которых происходит в едином технологическом цикле. В основном интегральные схемы (ИС) и, соответственно, элементы изготавливают методами планарной технологии. Это название технология получила потому, что все элементы конструктивно выполнены в плоскости полупроводниковой подложки или кристалла микросхемы. Это очень удобно при автоматизированном производстве, так как снижается стоимость конечного продукта. При этом на одном и том же оборудовании с применением аналогичных технологических процессов можно выпускать как отдельные (интегральные в корпусе) транзисторы, их сборки, так и законченные аналоговые узлы — микросхемы низкого, среднего и высокого уровней интеграции.

Планарные транзисторные структуры ИС можно условно разделить на группы по их площади, занимаемой на кристал-

ле. Такое деление определяет их основные параметры и назначение [2]. Занимающие малую площадь транзисторы имеют малую емкость переходов и высокое быстродействие, но при этом не могут выдерживать больших токов. Для применения ИС в мощных каскадах следует увеличивать площадь и размеры транзисторных структур, а это увеличивает межэлектродные емкости и ухудшает частотные свойства. Однако такие транзисторы могут рассеивать большую мощность и работать при повышенных токах (табл. 1). При рассмотрении кристалла микросхемы в микроскоп можно увидеть структуру планарных транзисторов, сопоставить размеры и особенности его топологии или рисунка (рис. 1). Транзисторы проектируют по топологическим чертежам, отличающихся от внешнего вида кристалла (рис. 2, 3).

Наиболее часто применяющиеся в ИС для преобразования электрических сигналов так называемые малосигнальные транзисторы имеют достаточно высокий коэффициент усиления по току, стабильный в широком диапазоне рабочих токов (рис. 4).

Планарная технология в силу своих особенностей открывает перед разработчиками ИС новые возможности в создании методов схемотехнического синтеза электронных узлов в составе микросхем различного назначения. Далее будут рассмотрены некоторые особенности интегральной схемотехники.

Биполярный п-р-п транзистор является наиболее важным и широко распространенным схемным элементом ИС. На его основе стараются создавать и другие элементы: диоды, стабилизаторы, конденсаторы и пр. Поэтому очень важно знать его основные свойства и особенности.

Поперечное сечение или структура транзистора (рис. 2) зависит от технологии изготовления ИС. С другой стороны, геометрические размеры, в том числе площади переходов, определяют электрические параметры ИС, необходимые для ее работы по назначению.

Одним из наиболее точно рассчитываемых параметров интегральных транзисторов п-р-п типа является напряжение $U_{БЭ}$. Если известно его значение при определенной температуре и рабочем токе, то можно математически определить его значение при любых других значениях температуры и тока. Зависимость, описывающая изменение напряжения $U_{БЭ}$, имеет вид:

$$U_{БЭ}[T, I_K] = \Delta\varepsilon(0) [1 - T/T_0] + U_{БЭ10} [T/T_0] + (nkT/q) \{ \ln (T_0/T) + (kT/q) \{ \ln [I_K(T)/I_K(T_0)] \} \}, \quad (1)$$

где $U_{БЭ}[T, I_K]$ — напряжение между базой и эмиттером транзистора при температуре T и токе коллектора I_K ; $\Delta\varepsilon(0) = 1,205$ В — величина ширины запрещен-

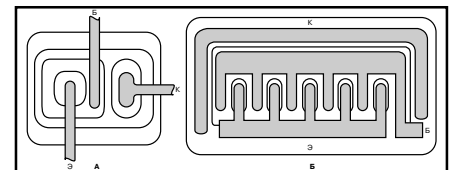


Рис. 1. Вид сверху на малосигнальный (а) и мощный (б) интегральные транзисторы

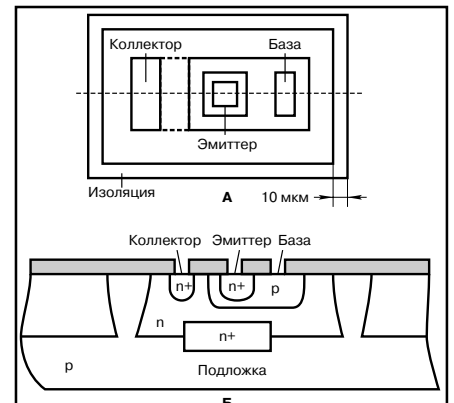


Рис. 2. Топология (а) и поперечное сечение (б) маломощного п-р-п транзистора

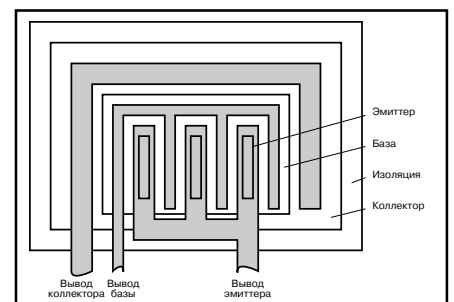


Рис. 3. Топология транзистора для больших токов

Таблица 1

Параметры интегрального транзистора	Значения параметров	
	для маломощного транзистора	для мощного транзистора
Граничная частота, ГГц	1	0,25
Сопротивление насыщения, Ом	20	1
Емкость коллектор-подложка, пФ	0,8	8
Обратное напряжение коллектор-эмиттер, В	> 20	> 30
Емкость коллектор-база, пФ	0,4	6
Допустимый ток эмиттера, мА	10	750
Площадь, занимаемая транзистором на подложке, мкм ²	60x90	450x500
Плотность тока, А/мм ²	2	3

Таблица 2

Параметр	Типовой диапазон значений	Величина разброса параметров	Величина разброса отношений величин	Температурный коэффициент (1/°C)	Величина температурного коэффициента разности величин (1/°C)
$h_{21Э}$	50...200	± 20 %	± 5 %	0,005	0,0005
$U_{БЭ}$	0,6...0,7 В	± 20 мВ	± 1 мВ	0,003 (2 мВ/°C)	± 10 мкВ
$U_{ЭБ0}$	6...9 В	± 200 мВ	± 25 мВ	2...6 мВ/°C)	± 200 мкВ

ной зоны кремния; $U_{БЭ10}$ — напряжение между базой и эмиттером транзистора при температуре T_0 и токе коллектора $I_{К0}$, $n = 1,5$ для кремниевых транзисторов, полученных методом двойной диффузии; T — абсолютная температура; T_0 — температура окружающей среды; $k/q = 86,2 \cdot 10^{-6}$ В/К.

Широкое распространение в аналоговых интегральных схемах получили схемные решения в которых применены два или более транзисторов. Схемы стабилизации тока, дифференциальные каскады усиления, токовые “зеркала” и динамические нагрузки — вот далеко не полный перечень таких узлов. Каждый транзистор в такой схеме имеет свою величину напряжения в заданной рабочей точке $U_{БЭ1}$ и $U_{БЭ2}$. Разность напряжений на переходах двух транзисторов возникает при раз-



Рис. 4. Зависимость $h_{21Э}$ от I_K для типичного интегрального транзистора

лет при токе I_1 , VT2 — при токе I_2 , а $I_1 \gg I_2$, получим:

$$U_{БЭ10} = U_{БЭ20} + (kT_0/q) \{ \ln [I_{K1}/I_{K2}] \} + (kT_0/q) \{ \ln [S_2/S_1] \}, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 — соответственно площади переходов транзисторов VT1 и VT2.

Несложно вычислить разность напряжений $U_{БЭ1}$ и $U_{БЭ2}$:

$$\Delta U_{БЭ} = (kT_0/q) \{ \ln [I_{K1}/I_{K2}] [S_2/S_1] \}. \quad (3)$$

Остановимся на этой формуле более подробно. Сначала построим зависимость $\Delta U_{БЭ} = K \cdot \ln N$ (рис. 5). Разность напряжений двух интегральных транзисторов, обеспечивающих работу узлов аналоговой ИС, может быть получена:

- при работе двух идентичных транзисторов, изготовленных в одном технологическом цикле, у которых площади переходов равны, т. е. $S_1 = S_2$, а токи коллекторных переходов разные. В этом случае реальное отношение токов I_{K1}/I_{K2} может дости-

гать 10...15, а величина $\Delta U_{БЭ} = 60...70$ мВ;

- при работе двух транзисторов, имеющих разные площади переходов, т. е. $S_1 \neq S_2$, и равенстве токов через их коллекторные переходы $I_{K1} = I_{K2}$. Реальное отношение площадей переходов находится в пределах 4...7, а величина $\Delta U_{БЭ} = 35...50$ мВ;
- при использовании транзисторов с разной площадью переходов и с различными коллекторными токами. В этом случае величина $\Delta U_{БЭ}$ наибольшая.

Все эти три случая наглядно иллюстрируются графиком на рис. 5.

Теперь проанализируем данные из табл. 2. Очевидно, что величина разброса коэффициента передачи тока $h_{21Э}$ и напряжения между эмиттером и базой $U_{БЭ}$ имеет значительно меньшую величину, чем у дискретных транзисторов [1, 2]. При этом транзисторы, изготовленные на одном кристалле и в едином технологическом цикле, имеют почти иден-

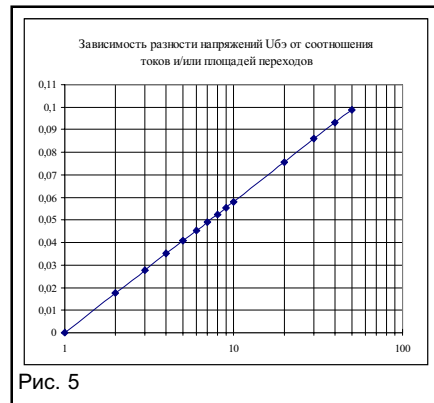


Рис. 5

тичные параметры: по $h_{21Э}$ разброс до 5%, а по $U_{БЭ}$ — до 0,15%.

Самые любознательные могут убедиться сами в замечательных свойствах транзисторов микросхемы и измерить их. Как это сделать? Оказывается, несложно. Необходимо лишь немного наблюдательности и умения пользоваться справочниками по микросхемам. Например, микросхема универсального стабилизатора КР142ЕН1, схема которой приведена на рис. 6, имеет транзисторы,

к которым можно подключиться, а схема измерения параметров известна.

В табл. 3 и 4 помещены экспериментальные данные измерений параметров интегральных транзисторов микросхемы типа КР142ЕН1В. Причем транзисторы VT10 и VT12 — малосигнальные, с небольшой площадью переходов, а VT13 — мощный и занимает большую часть кристалла. На рис. 7 построены графики изменения статического коэффициента передачи тока для мощного транзистора VT13 (его величина 80...90) и составного транзистора (VT10 + VT13) в диапазоне токов коллектора до 150 мА. График наглядно демонстрирует достаточную равномерность функции $h_{21Э}(I_{K1})$, как и было показано ранее (рис. 4). Аналогичные характеристики для дискретных транзисторов значительно хуже [1, 2].

Экспериментальные данные и рассмотренные выше соотношения дают возможность сделать интересный вывод. Начнем с результатов измерений $U_{БЭ}$ транзисторов VT10 и VT13 (табл. 3) при токе коллектора $I_K = 1$ мА. Соответственно имеем, что $U_{БЭ10} = 0,714$ В, а $U_{БЭ12} = 0,617$ В. Поэтому, с учетом формул (2) и (3), получим $\Delta U_{БЭ}$ двух транзисторов, работающих при одинаковых токах, но имеющих разные площади переходов, равным $0,714 - 0,617 = 0,097$ В. Подставляя в формулу [3] эту величину и принимая $I_{K10} = I_{K13}$, получим соотношение площадей переходов этих двух транзисторов равное $S_1/S_2 = 46$. Такой же результат получается и по графику на рис. 5. Таким образом, транзистор с током коллектора 150 мА имеет площадь переходов в 46 раз больше, чем у маломощного и, соответственно, во столько же раз большую площадь занимает на кристалле. При рассмотрении топологий мощных микросхем бросается в глаза то, что схема управления с большим числом транзисторов занимает на кристалле незначительную площадь, а мощные элементы (диоды, транзисторы) остальную большую часть.

И последнее. Как видно из табл. 3, два маломощных транзистора VT10 и VT12 имеют одинаковые величины напряжений $U_{БЭ}$, что подтверждает равен-

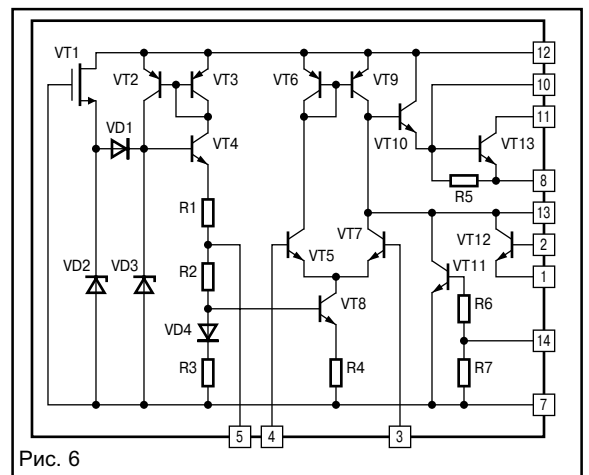


Рис. 6

Таблица 3

I_K (мА)	VT12			VT10			VT13		
	I_B (мкА)	$h_{21Э}$	$U_{БЭ}$	I_B (мкА)	$h_{21Э}$	$U_{БЭ}$	I_B (мкА)	$h_{21Э}$	$U_{БЭ}$
0,5	7	68	0,679	7	68	0,687	—	—	—
1	16	70	0,714	16	70	0,714	16	68	0,617
2	29	74	0,737	30	71	0,739	27	79	0,636
3	49	64	0,755	46	68	0,758	38	83	0,648
5	—	—	—	—	—	—	59	85	0,665
10	—	—	—	—	—	—	124	81	0,682
50	—	—	—	—	—	—	516	97	0,789
100	—	—	—	—	—	—	1500	70	0,871
150	—	—	—	—	—	—	9500	16	0,963

Таблица 4

I_K (мА)	VT13				VT10+VT13		
	I_B (мкА)	$h_{21Э}$	$U_{БЭ}$	I_B (мкА)	$h_{21Э}$	$U_{БЭ}$	
1	16	62,5	0,617	4	250	—	
2	27	74,1	0,636	6	333	—	
3	38	78,9	0,648	8	375	—	
5	59	84,7	0,665	12	417	—	
10	124	80,6	0,682	21	476	—	
15	176	85,2	0,703	29	517	—	
25	270	92,6	0,735	43	581	—	
50	516	96,9	0,789	80	625	—	
80	—	—	—	128	625	—	
100	1500	66,7	0,871	144	694	—	
110	2170	50,7	0,892	157	701	—	
120	—	—	—	173	694	—	
130	4670	27,8	0,94	190	684	—	
140	—	—	—	209	670	—	
150	9500	15,8	0,963	231	649	—	

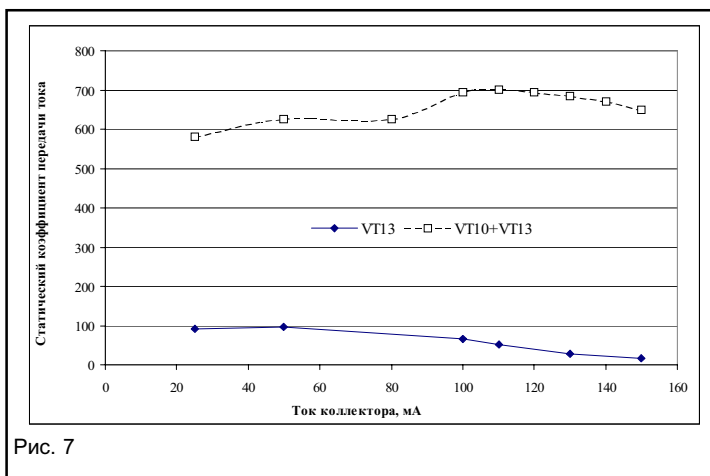


Рис. 7

с т в о
 площа-
 дей пе-
 реходов
 их струк-
 тур, а
 также ос-
 новное пре-
 имущество ин-
 тегральной
 технологии –
 идентичность
 параметров
 транзисторов,
 изготовленных
 в едином тех-
 нологическом
 цикле.

Игорь Кольцов,
 editor@dian.ru

Литература

1. И. Л. Кольцов. О биполярном транзисторе замолвим мы слово.... — Схемотехника, 2001, № 7–8.
2. А. Б. Гребен. Проектирование аналоговых интегральных схем: Пер. с англ.— М.: Энергия, 1976.
3. В. Л. Шило. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. — М., “Сов. радио”, 1974.