

5. Находим $(p_n$ по формуле (8).
6. Находим число импульсов обратной связи j .
7. Находим $X(nT+kT)$ и $a>(nT+kT)$ по формулам (3.4) и (4) соответственно.
8. Если выполняется условие окончания моделирования, то переход к пункту 11.
- 9.1. Если $m\sim_n > 0$ и $k=m$, то полагаем $m+ = 0$, а также находим $m^{(o)+_l}$ из (6).
- 9.2. В противном случае находим из (5).
10. Полагаем $n=n+k$ и переходим к пункту 2.
11. Конец.

Описанный алгоритм реализован на языке Pascal в среде Delphi. Проведенное сравнительное моделирование по предложенной модели показало адекватность получаемых результатов для различных вариантов схемотехнической реализации синтезаторов частот.

Литература

1. Шапиро, Д. Н. Основы теории синтеза частот. М. : Радио и связь, 1981.
2. Рыжков, А. В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М. : Радио и связь, 1991.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК P_N-ТРАНЗИСТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЁНКИ

Н. Л. Дудар¹, В. М. Борздов²

¹НПО «Интеграл» Минск, Беларусь, ²БГУ, Минск, Беларусь

При создании современных силовых интегральных микросхем [1, 2] используется разнообразный набор элементов: ДМОП-, КМОП-, биполярные транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы. Чтобы изготовить интегральную схему с заданными свойствами, необходимо получить требуемые параметры вольт-амперных характеристик элементов этой схемы. Важным и необходимым этапом разработки и оптимизации технологии изготовления новых изделий электронной техники является моделирование полупроводниковых структур с использованием как физических моделей операций, входящих в состав технологического маршрута, так и физических моделей переноса носителей заряда с целью расчета электрических характеристик проектируемого элемента интегральной схемы [3, 4].

Биполярные транзисторы [4] находят широкое применение, как в дискретном исполнении, так и в составе интегральных схем различного назначения. В данной работе приводятся результаты оптимизационного моделирования операций технологического маршрута и электрических характеристик горизонтального рпр-транзистора [4]. Конечная цель исследований состояла в определении параметров технологического маршрута формирования горизонтального рпр-транзистора, обеспечивающих коэффициент усиления транзистора свыше 20, пробивное напряжение коллектор-эмиттер свыше 20 В. Моделирование транзистора выполнялось с использованием программного пакета компании Silvaco [5]. Моделирование технологического маршрута осуществлялось в среде модуля ATHENA (ядром которого является программа двумерного физического моделирования технологии SSuprem4), а расчет электрических характеристик исследуемого прибора проводился в среде модуля ATLAS (программа S-PISCES).

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ Р⁺Р-ТРАНЗИСТОРА

Структура исследуемого рпр-транзистора, полученная в результате моделирования технологического процесса его изготовления, приведена на рис. 1. Исследуемый технологический маршрут формирования структуры кремниевого рпр-транзистора с коэффициентом усиления свыше 20 и пробивным напряжением коллектор-эмиттер свыше 20 В включает следующие операции:

- 1) формирование скрытых областей базы п⁺-типа посредством ионного легирования сурьмой и её последующей разгонки в подложке р-типа;
- 2) осаждение на подложку эпитаксиальной пленки п-типа;
- 3) формирование толстого локального окисла;
- 4) формирование областей коллектора и эмиттера р-типа посредством ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 5) формирование контактных областей р⁺-типа посредством ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 6) нанесение межслойного окисла и формирование в нем контактных окон;
- 7) напыление металла под контакты.

Расчет технологических параметров областей исследуемого транзистора и режимов их формирования проведен с помощью программы SSuprem4.

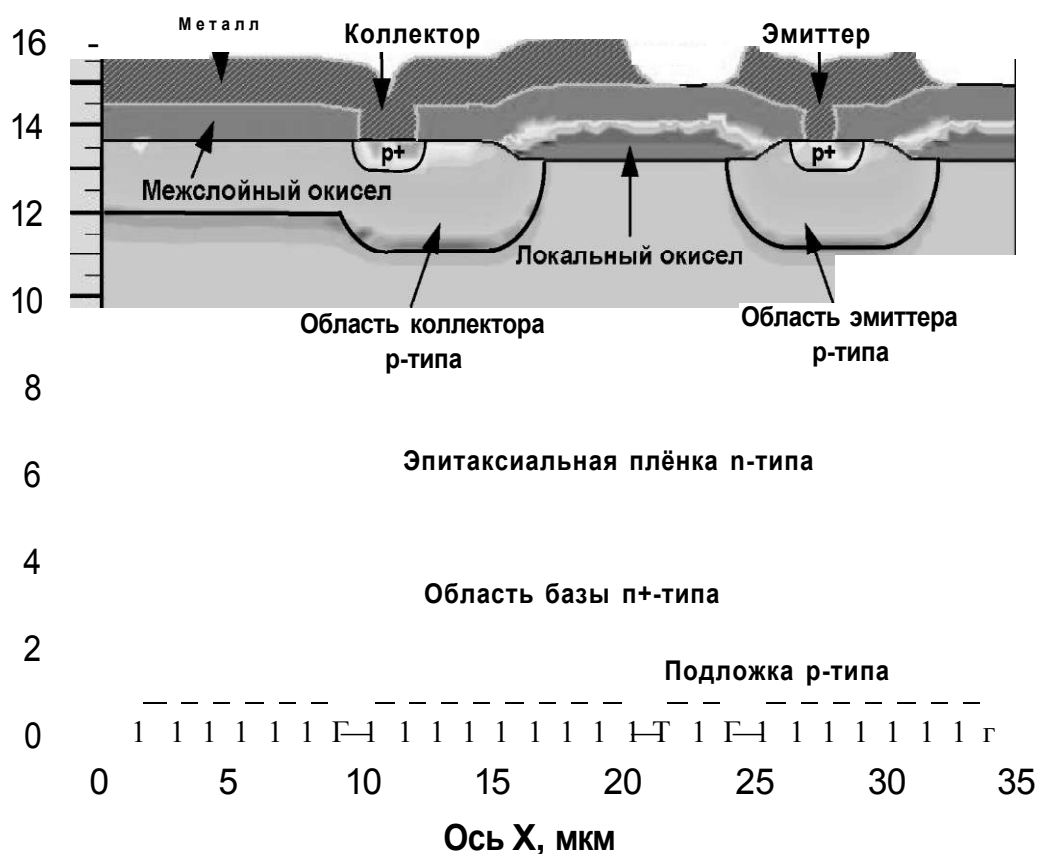


Рис. 1. Структура биполярного транзистора, полученная в результате моделирования

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК PNP-ТРАНЗИСТОРА

Одной из важнейших характеристик любого биполярного транзистора является коэффициент усиления в для случая включения транзистора по схеме с общим эмиттером. Для исследуемого рпр-транзистора необходимо было получить значение коэффициента усиления в свыше 20 при напряжении коллектор-эмиттер $u_{КЭ} = 5$ В.

Коэффициент усиления транзистора в определяется как отношение тока коллектора к току базы при заданном напряжении коллектор-эмиттер. Одной из целей данной работы было определение параметров эпитаксиальной плёнки, при которых можно получить оптимальные значения коэффициента усиления транзистора. На рис. 2 приведены зависимости тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при токе базы $I_B = 5$ мкА для различных сочетаний параметров эпитаксиальной плёнки, полученные в результате моделирования. График 1 соответствует случаю, когда толщина эпитаксиальной плёнки $d=10$ мкм, а её удельное сопротивление $\rho_V = 1,5$ Ом^{см}; график 2 построен для случая, когда $d=12$ мкм, а $\rho_V = 2,0$ Ом^{см}; график 3 - для случая, когда $d=10$ мкм, а $\rho_V = 2,0$ Ом^{см}; график 4 - для случая, когда $d=12$ мкм, а $\rho_V = 1,5$ Ом^{см}. Как видно из рис. 2, максимальные значения тока коллектора, а следовательно, и значения коэффициента усиления транзистора получены тогда, когда толщина эпитаксиальной плёнки $d=10$ мкм, а её удельное сопротивление $\rho_V=1,5$ Ом^{см}. В табл. 1 приведены значения коэффициента усиления в исследуемого биполярного транзистора,

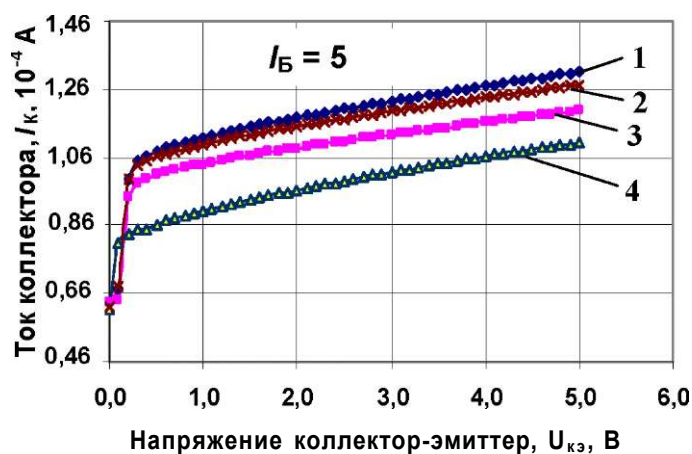


Рис. 2. Зависимость тока коллектора транзистора от напряжения коллектор-эмиттер при токе базы $I_B = 5$ мкА для случаев различного сочетания параметров эпитаксиальной плёнки:

- график 1 - толщина эпитаксиальной плёнки $d=10$ мкм, а её удельное сопротивление $\rho_V = 1,5$ Ом^{см};
- график 2 - $d=12$ мкм, а $\rho_V = 2,0$ Ом^{см};
- график 3 - $d=10$ мкм, а $\rho_V = 2,0$ Ом^{см};
- график 4 - $d=12$ мкм, а $\rho_V = 1,5$ Ом^{см}

следовательно, при создании структуры исследуемого биполярного *pnp*-транзистора необходимо использовать эпитаксиальную плёнку с указанными параметрами.

полученные при токе базы $I_B = 5$ мкА, напряжении коллектор-эмиттер $u_{кэ} = 5$ В при различных сочетаниях параметров эпитаксиальной плёнки. Как видно из табл. 1, требуемые значения в (в должен быть > 20) были получены при всех использовавшихся сочетаниях параметров эпитаксиальной плёнки. Максимальное значение коэффициента усиления, равное 26,25 (табл. 1) было получено для случая, когда $d=10$ мкм, а $\rho_V = 1,5$ Ом^{см},

Таблица 1

Расчётные значения коэффициента усиления биполярного транзистора β , полученные при токе базы 5 мкА, напряжении коллектор-эмиттер 5 В и различных сочетаниях параметров эпитаксиальной плёнки

		Коэффициент усиления, β , ед.
Минимум		20
Максимум		-
Толщина эпитаксиальной плёнки	Удельное сопротивление эпитаксиальной плёнки	
d=10 мкм	$\rho_V = 1,5 \text{ Ом}^{\text{см}}$	26,25
d=12 мкм	$\rho_V = 2,0 \text{ Ом}^{\text{см}}$	25,48
d=10 мкм	$\rho_V = 2,0 \text{ Ом}^{\text{см}}$	23,93
d=12 мкм	$\rho_V = 1,5 \text{ Ом}^{\text{см}}$	22,04

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе моделирования были определены параметры технологического процесса, по которому изготавливается исследуемый pnp-транзистор. При создании структуры исследуемого биполярного pnp-транзистора рекомендуется использовать эпитаксиальную плёнку с толщиной $d=10$ мкм и удельным сопротивлением $\rho_V = 1,5 \text{ Ом}^{\text{см}}$, так как при таких параметрах было получено максимальное значение коэффициента усиления транзистора β .

Литература

1. Флоренцев, С. Тенденции развития приборов силовой электроники // Электронные компоненты, 2004. № 8. С. 127-136.
2. Лоренц, Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки производства и применения силовых полупроводниковых приборов // Электротехника, 2001. № 12. С. 2-12.
3. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти и др. : Пер. с англ. М. : Радио и связь, 1988. 490 с.
4. Блюхер, А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. М. : Энергоатомиздат, 1991, 248 с.
5. Интернет-адрес: <http://www.silvaco.com>.