

Результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии с граничной частотой 10 ГГц и более

Д.Г. Дроздов, А.М. Зубков, Е.М. Савченко

ФГУП "НПП "Пульсар", pulsar@dol.ru

Аннотация — В статье рассматриваются результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии, обеспечивающей граничную частоту транзисторов 10 ГГц и пробивное напряжение $U_{ce}=12$ В. Моделирование проводится с помощью программного комплекса Sentaurus TCAD компании Synopsys. Проведена оптимизация технологического процесса изготовления транзисторов с целью сокращения числа операций фотолитографии и исключения операции быстрого термического отжига (БТО) примеси.

Ключевые слова — ИМС, pnp- и rnp-транзисторы, граничная частота, САПР TCAD.

I. ВВЕДЕНИЕ

Быстродействующие широкополосные аналоговые ИМС (операционные усилители, логарифмические усилители, буферные усилители, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи) на основе комплементарной биполярной технологии находят широкое применение в современной аппаратуре.

Быстродействие таких схем напрямую связано с граничной частотой используемых транзисторов. Наибольшие сложности представляет создание rnp-транзисторов, сопоставимых по значению граничной частоты с pnp-транзисторами.

Существующие в РФ комплементарные биполярные технологии не обеспечивают высоких значений граничной частоты транзисторов. Например, процесс разработанный во ФГУП "НПП "Пульсар" позволяет создавать комплементарные транзисторы ($U_{ce} > 36$ В) с граничной частотой до 2 ГГц [1]. Граничные частоты транзисторов, создаваемых ОАО "НИИ ТАП" совместно с ОАО "НИИМЭ и Микрон", ограничены значениями 2,5÷3,5 ГГц при пробивном напряжении $U_{ce}=15$ В [2].

В отличие от освоенных в РФ технологий производства у иностранных фирм-производителей аналоговых ИМС граничные частоты комплементарных транзисторов превышают значение 5 ГГц. Например, процесс VIP-10 фирмы National Semiconductor, использующий технологию кремний-на-изоляторе, обеспечивает f_t транзистора 8 ГГц при напряжении питания 12 В [3]. Процесс HJV компании Zarlink Semiconductor Inc., ис-

пользующий комбинированную изоляцию, позволяет создавать транзисторы с $f_t=9$ ГГц и $U_{ce}=14$ В [4].

Анализ показывает, что для обеспечения соответствующих характеристик необходимо применять методы самосовмещения, полную диэлектрическую или комбинированную изоляцию, использовать поликремний для создания мелкозалегающих p-n переходов. При этом, учитывая специфику отечественного производства, новые технологические процессы должны иметь минимальное число операций фотолитографии, а также, по возможности, должны быть исключены сложные технологические операции, требующие дорогостоящего оборудования (в частности, для проведения операции БТО).

Таким образом целью работы являлась разработка и приборно-технологическое моделирование технологического процесса изготовления высокочастотных комплементарных биполярных транзисторов с граничной частотой 10 ГГц и $U_{ce} \geq 12$ В с минимальным количеством операций фотолитографии без использования БТО.

II. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи применялось моделирование в САПР Sentaurus TCAD компании Synopsys.

Моделирование технологических операций проводилось в программе DIOS. Как было показано в работах [5] и [6], использование данной программы (в сравнении с программой SProcess) позволяет улучшить сходимость результатов моделирования процессов диффузии и имплантации примеси с результатами измерений, за счёт правильного выбора модели. Кроме того, отметим, что на каждом этапе моделирования необходимо точно контролировать граничные условия: Si/Si, Si/SiO₂, Si/Si (поликристаллический). Это позволит адекватно оценивать результаты таких процессов как сегрегация примеси в растущий оксид, автолегирование и обратная диффузия в ходе эпитаксиального роста кремния, диффузия примеси из поликремния.

Для расчёта электрофизических характеристик транзисторов использовалась программа SDevice, в частности расчёт ВАХ производился с помощью диффузион-

но-дрейфовой модели с учетом лавинной генерации носителей заряда. Оценка частотных свойств проводилась с помощью малосигнального АС-анализа.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА

В ходе эпитаксиального роста кремния, возникают процессы автолегирования и обратной диффузии примеси, которые существенным образом влияют на итоговую толщину слаболегированной пленки. Эти процессы имеют важное значение для pnp-транзисторов, поскольку бор обладает существенно большим коэффициентом диффузии, по сравнению с сурьмой, что приводит к увеличению диффузии из скрытого слоя. Для уменьшения автолегирования и обратной диффузии исследовался метод дополнительного окисления поверхности после формирования скрытых слоев. Это позволяет снизить поверхностную концентрацию примеси и получить необходимый профиль распределения примеси за счёт сегрегации бора в растущий окисел.

В результате проведенной оптимизации были получены следующие параметры эпитаксиальной пленки: толщина 2 мкм, удельное сопротивление $\rho=1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, температура процесса $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость роста 500 нм/мин. Получен режим дополнительного окисления, который обеспечивает получение заданных параметров: атмосфера – пары воды; температура = $1050 \text{ }^\circ\text{C}$; время = 30 мин. На рис. 2 представлены варианты профиля распределения примеси при проведении дополнительной операции окисления и без неё. Из графика видно, что применение режима позволяет уменьшить толщину пленки, подверженную автолегированию, на 25 %, что обеспечивает увеличение пробивного напряжения.

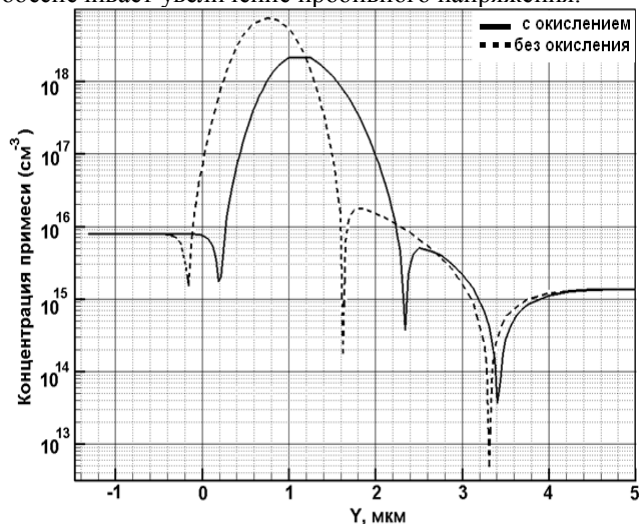


Рис. 2. Профиль распределения примеси для случая дополнительного окисления и без окисления

При применении данного метода управления конечной толщиной нелегированной области необходимо контролировать изменение поверхностного сопротивления, пробивного напряжения, а также напряжение про-

кола изоляции pnp-транзистора. Значение пробивного напряжения перехода коллектор-изоляция (U_{p+n-}) для разрабатываемой технологии составило $\sim 20 \text{ В}$.

VI. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ В КОЛЛЕКТОРЕ PNP-ТРАНЗИСТОРА

Для увеличения произведения граничная частота \times пробивное напряжение в современных транзисторах активно используется неоднородное распределение примеси в коллекторе [7].

Традиционно неоднородный профиль распределения примеси применяется для pnp-транзисторов. В нашей работе проводится исследование способов создания такого профиля для вертикальных pnp-транзисторов.

По результатам моделирования при градиентном и ретроградном распределении примеси в коллекторе pnp-транзистора произведение $f_t \cdot U_{ce}$ более чем на 20 % превышает это же произведение для случая равномерного профиля легирования. Рассмотрим варианты получения неоднородного распределения примеси в коллекторе pnp-транзистора.

Технология формирования градиентного распределения заключается в использовании имплантации с высоким значением энергии ионов ($>150 \text{ кЭв}$). При этом маской должна являться система материалов оксид/нитрид кремния. Si_3N_4 значительно лучше защищает поверхность кремния при ионной имплантации по сравнению с SiO_2 (для одинаковых параметров имплантации глубина проникновения через нитрид \sim на 30 % ниже, чем через оксид кремния). Тем не менее использование только нитрида кремния в качестве маски невозможно, поскольку способствует появлению дефектов кристаллической решетки. Кроме того, использование в качестве подслоя оксида кремния позволяет сократить число радиационных дефектов, что обязательно при использовании высоких энергий ионов.

Способ получения ретроградного профиля заключается в последовательном использовании двух операций имплантации. Кроме формирования необходимого профиля, это позволяет сократить время высокотемпературной обработки, необходимой для полной перекомпенсации эпитаксиального слоя. Как и в случае формирования градиентного профиля, одна из операций имплантации проводится с высокой энергией ионов.

В статье [7] показано, что необходимость использования градиентного или ретроградного профилей распределения определяется параметрами эпитаксиальной пленки. На основе этого был выбран вариант с градиентным распределением примеси.

На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения примеси для вертикального pnp-транзистора.

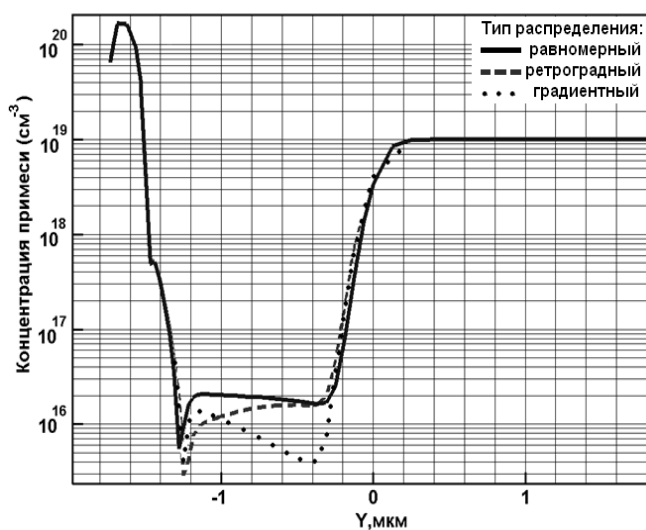


Рис. 3. Различные варианты распределения примеси в коллекторе pnp-транзистора

V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАНАРИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

В разрабатываемой технологии будут использоваться стандартные методы формирования глубокой щелевой изоляции. Для заполнения таких щелей, как правило, применяется поликристаллический кремний, поскольку он удовлетворяет требованиям по простоте заполнения, стойкости к эрозии при воздействии жидкостных методов травления, химической стабильности при высокотемпературных обработках [8]. После заполнения щель необходимо покрыть диэлектриком, и далее провести планаризацию поверхности.

Закрыть щель можно как с помощью процессов термического окисления, так и с помощью осаждения SiO₂. В большинстве случаев при использовании окисления эту операцию совмещают с формированием областей локального окисления (ЛОКОС), которые позволяют сократить размеры пассивных областей транзисторов, уменьшить паразитные емкости и сопротивления. Для этого проводится фотолитография, далее с помощью селективного травления удаляется нитрид кремния и проводится окисление. Рассчитывался вариант отжига в атмосфере паров воды при температуре T=950 °C в течение 40 минут.

Второй вариант – осаждение слоя SiO₂ с последующим использованием данного материала в качестве маски для имплантации базы pnp-транзистора.

На основании результатов моделирования было показано, что использование варианта осаждения диэлектрика и отказ от ЛОКОС изоляции позволяет формировать транзисторы с требуемыми значениями граничной частоты. Поэтому с целью упрощения технологии изготовления выбран второй вариант. Также в этом случае удается сократить число фотолитографий.

VI. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В кремниевой подложке (КДБ-10) с кристаллографической ориентацией (111) формируются скрытые слои с помощью ионной имплантации примеси: сурьма – коллектор n+; фосфор – изоляция n-; бор – коллектор p+. Для каждого из скрытых слоев были выбраны технологические режимы с учетом требований по минимальному сопротивлению и пробивному напряжению.

Проводится рассмотренное выше окисление кремния, эпитаксиальный рост пленки кремния, и затем локальная перекомпенсация эпитаксиального слоя для формирование области коллектора pnp-транзистора. Для создания областей глубокого коллектора pnp- и pnp-транзисторов применяются последовательные операции имплантации бора и фосфора.

Затем на поверхность пластины последовательно осаждаются слои SiO₂ и Si₃N₄, выступающие в качестве маски при травлении щелевой изоляции.

После травления, заполнение щелей и планаризации поверхности через маску из осажденного SiO₂ проводится имплантация базы pnp-транзистора. На основе сравнения результатов моделирования в качестве примеси была выбрана сурьма, обеспечивающая заданную толщину активной базы.

Далее проводится нанесение SiO₂, фотолитография базы pnp-транзистора, осаждение и анизотропное травление слоев Si₃N₄, выступающих в роли спейсеров (областей диэлектрика, разделяющих пассивную базу и эмиттер). Толщина используемого Si₃N₄ составляет 0,2 мкм. При проектных нормах 1 мкм это позволяет сократить размеры эмиттера на 0,4 мкм, обеспечить снижение емкости эмиттерного перехода и приемлемое сопротивление базы.

Дальнейшая последовательность технологических операций следующая:

- осаждение первого слоя поликремния;
- имплантация бора, применяемая для создания эмиттера pnp-транзистора, а также электродов базы pnp-транзистора.
- осаждение SiO₂;
- травление SiO₂ для формирования окна под активную базу pnp-транзистора;
- имплантация бора;
- травление SiO₂ для формирования пассивной базы pnp-транзистора, изоляции от подложки, коллектора pnp-транзистора;
- формирование спейсеров pnp-транзистора;
- осаждение второго слоя поликремния;
- имплантация мышьяка.

Для активации примеси эмиттера pnp-транзистора и формирования необходимой толщины активной базы применялся отжиг при температуре 950 °C в течение 10 минут в инертной атмосфере. После этого проводится вскрытие контактных окон и последующие операции для формирования металлизации.

Таким образом, разработанная технология, без учёта операций по формированию металлизированной разводки, включает в себя 13 фотолитографий. Для сравнения, зарубежные технологические процессы используют $24 \div 30$ операций фотолитографии.

VII. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Основными критериями при оптимизации технологии изготовления транзисторов являлись значение граничной частоты = 10 ГГц и пробивного напряжения коллектор-эмиттер U_{ce} не менее 12 В. По результатам оптимизации технологического маршрута с учетом описанных выше технологических особенностей были получены следующие параметры транзисторов (для площади эмиттера $S_3 = 0,6 \times 1,0 \text{ мкм}^2$): для pnp-транзистора: $f_t = 10.4 \text{ ГГц}$, $U_{ce} = 12 \text{ В}$, $h_{21} = 140$, $U_a = 25$; для npn-транзистора: $f_t = 10.1 \text{ ГГц}$, $U_{ce} = 12 \text{ В}$, $h_{21} = 120$, $U_a = 20$.

На рисунках 5 - 8 представлены результаты моделирования основных характеристик комплементарных транзисторов.

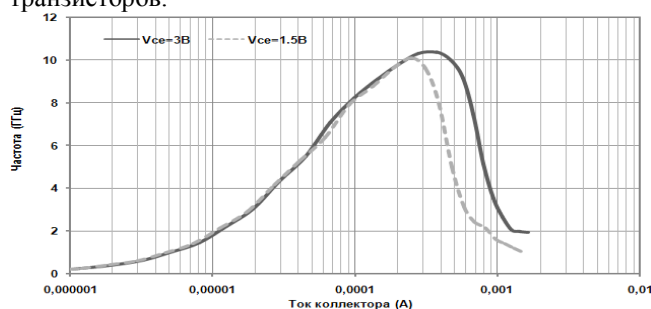


Рис. 5. Зависимость граничной частоты от тока коллектора pnp-транзистора

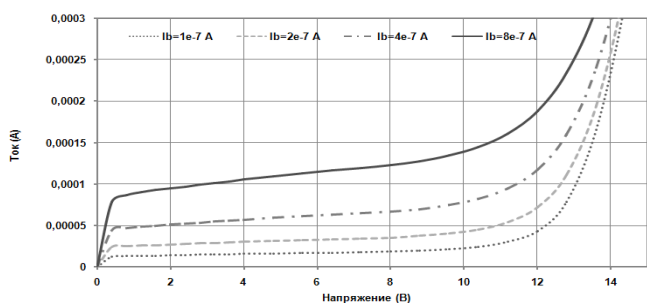


Рис. 6. VAX npn-транзистора

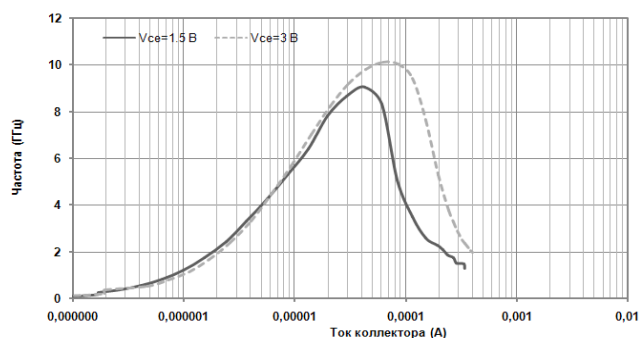


Рис. 7. Зависимость граничной частоты от тока коллектора npn-транзистора

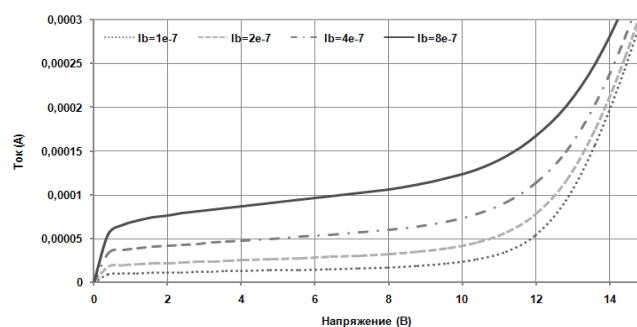


Рис. 8. VAX pnp-транзистора

В результате моделирования установлено что механические напряжения могут существенно влиять на параметры транзисторов. Поэтому в дальнейшем планируется провести исследования по их снижению, а также по увеличению напряжения Эрли.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов появляется возможность создания отечественного технологического процесса с комплементарными биполярными транзисторами с $f_t = 10 \text{ ГГц}$ и $U_{ce} \geq 12 \text{ В}$. В дальнейшем Это позволит создать новый класс отечественных широкополосных и быстродействующих аналого-цифровых ИМС и обеспечить технологическую независимость РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Виноградов Р. Н. Комплементарность биполярных транзисторов - преимущество полупроводниковой электроники // Электронная промышленность. - 1997. - N4.
- [2] Хохлов М.В., Демин А.А, Морозов В.Ф. Разработка комплементарной биполярной технологии для реализации аналоговых ИМС высокого быстродействия / «Пульсар-2008». Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. Материалы VII научно-технической конференции. - Москва, 2008, с. 62-63.
- [3] <http://www.national.com/>
- [4] Wilson M.C., Nigrin S., Harrington S. J., Manson A. J., Thomas S., Benton L., Connor S. and Osborne P.H., A 12Volt, 12GHz Complementary Bipolar Technology for High Frequency Analogue Applications // Proceedings of the IEEE 32th European Solid-State Device Research Conference. - 2002. - P. 375-378.
- [5] Виноградов Р. И., Дроздов Д. Г., Корнеев С. В. Выбор оптимального маршрута моделирования диффузионных процессов с использованием САПР TCAD // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. - 2009. - № 1. - С. 65-72.
- [6] Cherkaev A.S., Makarov E.A., Kalinin S.V. The Mathematical Modeling of the MOS-transistors Fabrication Technique in Modern TCAD-systems // International Siberian workshop and tutorials on electron devices and materials. Novosibirsk: NSTU. - 2008. - P. 79-83.
- [7] Jong-Ho Lee, Won-Gu Kang, Jong-Son Lyu, Jong Duk Lee, Modeling of the Critical Current Density of Bipolar Transistor with Retrograde Collector Doping Profile // IEEE Electron Device Letters. - 1996. - V. 17. - № 3. - P. 109 - 111.
- [8] Bolbot P.H., Roberts M.C., Medhurst P.L. A comparison of trench filling materials for sub-micron CMOS // J. Phys. Colloques. - 1988. - V. 49. - № C4. - P. 537 - 540.