

Электронные системы

УДК 621.316.54:621.314.632

Л.Н. Павлов, канд. техн. наук, Ю.М. Калниболовский, д-р техн. наук

Минимизация влияния паразитных структур в преобразователях DC/DC

Рассматривается задача минимизации влияния паразитных структур, которые активизируются при работе ряда блоков в преобразователях постоянного тока. Исследованы подходы для решения этой задачи.

The task to decrease of parasitic structures influence, that take place usually in of DC/DC converters' blocs, is considered. Some methods to solve this problem are investigated.

Введение

Особенность современных интегральных преобразователей DC/DC состоит в том, что при минимальных размерах кристалла необходимо обеспечить высокий коэффициент полезного действия при достаточно высокой частоте преобразования. Например в DC/DC [1] эта частота составляет 600кГц. При таких частотах преобразования собственные компоненты интегральной схемы (ИС) обладают высоким быстродействием и, как следствие, высокой чувствительностью к эффектам активизации паразитных структур. Некоторые такие эффекты, возникающие при работе ключа, интегрированного на общем кристалле, рассмотрены в работах [2, 3].

Задача данной работы состоит в исследовании и минимизации влияния эффекта насыщения биполярных интегральных транзисторов.

Актуальность данной задачи можно пояснить следующим примером. Популярная серия преобразователей UC384x (UC3842, UC3843, UC3844, UC3845) прошла несколько этапов развития, воспроизвела разными всемирно известными корпорациями. При этом наибольшие усилия прилагались к отработке узлов, где элементы входили в насыщение. В частности, ключ задающего генератора первоначально был выполнен на основе вертикального подложечного PNP-транзистора. На втором этапе – на основе NPN-транзистора. На третьем этапе – снова на основе PNP-транзистора.

Основная часть

Рассмотрим разрез структуры интегрального NPN-транзистора, рис. 1.

Здесь обозначены: 1 – разделительная диффузия P-типа, 2 – эпитаксиальный слой N-типа,

3 – коллектор из слоя N+, 4 – база из слоя P-типа, 5 – эмиттер из слоя N+, 6 – скрытый слой N+, 7 – исходная подложка P-типа.

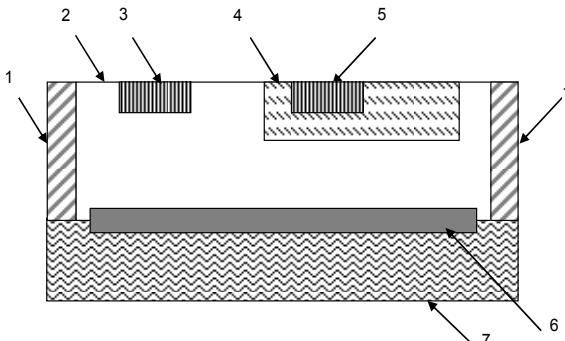


Рис.1. Разрез структуры NPN-транзистора

При определенных условиях возможна активизация структуры из областей 4-2-1, т.е., по сути – вертикального подложечного PNP-транзистора. Статический коэффициент усиления этой структуры при отсутствии скрытого слоя 6 может достигать значений $B = 600 - 700$. Наличие скрытого слоя снижает коэффициент усиления до значений $B = 80 - 100$.

При увеличении напряжения эмиттер-база (области 5 – 4) до значений 1,5 – 2,0 В NPN-транзистора входит в режим глубокой инжекции. При ограничении коллекторного тока транзистора напряжение эмиттер-коллекторе снижается до уровня порядка 0,3 В. Происходит уменьшение коэффициента усиления, увеличение тока базы NPN-транзистора. Этим характеризуется квазинасыщение, при котором активизируется паразитный PNP-транзистор, эмиттером которого является область 4 базы основного транзистора, базой – N-область 2 эпитаксии, а коллектором – область 1 разделения и материал исходной подложки P-типа. Упрощенная эквивалентная схема этого эффекта представлена на рис. 2. Здесь резистор R1 упрощенно представляет распределенное сопротивление базы VT1. Резистор R2 упрощенно представляет распределенное сопротивление зоны разделения и исходной подложки. Эксперименты показывают, что если на резисторе падение напряжения превышает 0,3В, то это уже проявляется на соседних карманах. В этом случае область скрытого слоя 6 выступает в качестве эмиттера паразитного NPN-транзистора. Базой этого тран-

зистора выступает подложка, а коллектором – ближайшие области карманов соседних компонентов, которые находятся под положительным напряжением, рис. 3.

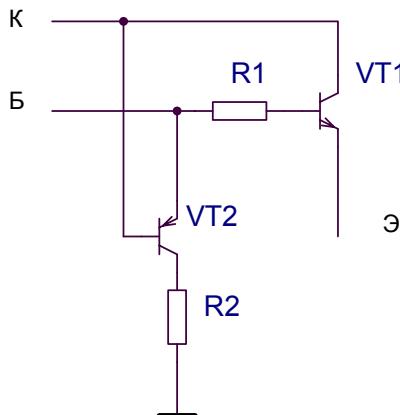


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная схема эффекта квазинасыщения структуры NPN-транзистора

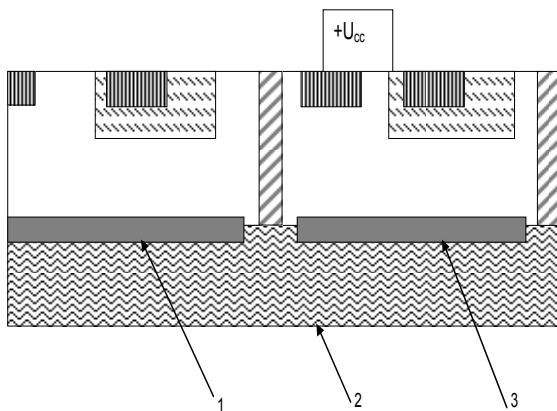


Рис. 3. Упрощенная схема эффекта образования паразитного межкарманного NPN-транзистора. 1 – эмиттер из слоя N^+ , 2 – база P-типа, 3 – коллектор из слоя N⁻

Таким образом, эквивалентная схема для моделирования эффекта насыщения должна быть дополнена NPN-транзистором, рис. 4. Наибольшая опасность для работоспособности схемы наблюдается в том случае, когда эмиттер рабочего транзистора не заземлен. Эксперименты показывают, что именно в этом случае наиболее часто наблюдаются отказы схемы: брак по выходным параметрам, нестабильность характеристик во времени, катастрофические отказы. В некоторых случаях паразитный транзистор провоцирует тиристорный эффект (latch up), вплоть до перегорания металлизированных проводников ИС.

Минимизация паразитных эффектов достигается введением так называемого глубокого (вертикального) коллектора, проникающего кольцом между базой и разделением от слоя N⁺ (эмиттерная диффузия NPN-транзистора) до скрытого слоя, рис. 5. В этом случае база рабочего транзистора оказывается в своеобразном

«стакане», изолирующим ее от областей разделения.

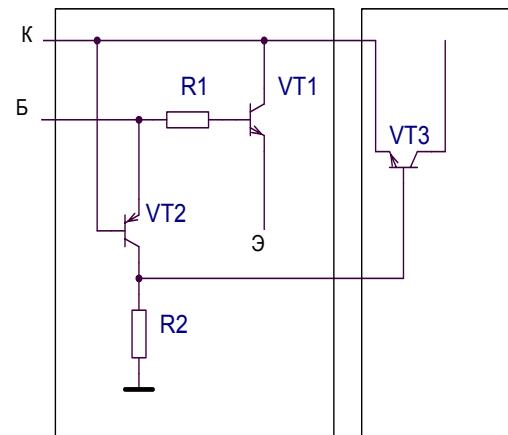


Рис. 4. Эквивалентная схема для моделирования эффекта насыщения NPN-транзистора

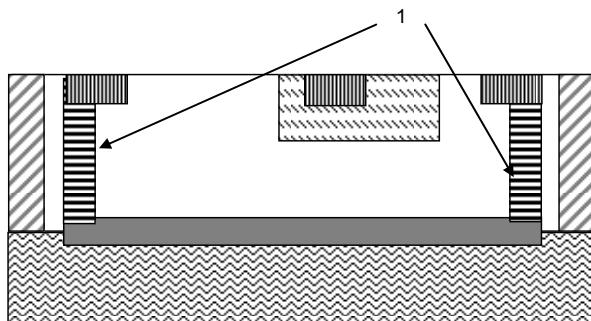


Рис.5. Разрез структуры NPN-транзистора, защищенного от паразитного PNP-транзистора. 1 – область глубокого коллектора

Физическая сущность этого решения состоит в существенном снижении коэффициента усиления паразитного транзистора за счет повышения концентрации примесей N-типа: вместо концентрации примесей эпитаксиального слоя коэффициент усиления теперь определяется легированным слоем глубокого коллектора. Измерения коэффициента усиления паразитного PNP-транзистора показали значения от $B = 0,1$ до $B = 0,001$. Подобный разброс значений характерен для минимальной топологической ширины области глубокого коллектора и сравнительно толстой эпитаксиальной пленки технологического процесса, ориентированного на пробивные напряжения до 45 В. Эффективность этого решения подтверждена компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями.

Недостаток такого решения – существенное увеличение площади транзистора и увеличение емкости коллектора. При включении транзистора эмиттерным повторителем емкость коллектора роли не играет и такое решение вполне применимо в преобразователях типа [1]. Но применение этого подхода увеличивает пло-

щадь кристалла и снижает его конкурентную способность. Поэтому такое решение применяется в первую очередь для тех NPN-транзисторов, у которых область эмиттера не заземлена и, вследствие этого, подобный транзистор представляет особую опасность в случае возникновения паразитного эффекта.

Для NPN-транзисторов с заземленным эмиттером, как правило, достаточно подключение области разделения к «земляной» контактной площадке металлизированным проводником и дополнительного легирования зоны разделения, например, слоем базовой диффузии, а также другими слоями проводимости P-типа. Разумеется, конфигурация зон легирования выбирается такой, чтобы при этом соблюдались нормативы по пробивным напряжениям областей «карман» – «разделение».

При моделировании паразитных эффектов определенную трудность составляет оценка параметров модели.

Для паразитного PNP-транзистора в качестве площади эмиттера может быть взята площадь базы рабочего NPN-транзистора. Ориентировочный коэффициент усиления для примерного расчета $B = 100$. Понятно, что в зависимости от проработки зоны разделения это значение может быть уменьшено. При введении глубокого коллектора минимальной топологической ширины для приближенных расчетов это значение может быть уменьшено до 0,01. С учетом того, что ток ключа составляет три ампера, то инжекцию в подложку тока 10-30 мА в ряде случаев необходимо учитывать.

Для паразитного межкарманного NPN-транзистора выбор коэффициента усиления представляет наибольшую проблему. Экспериментальное исследование этой структуры показало следующие тенденции. Коэффициент усиления представляет собой функцию, которая зависит как от расстояния (ширины базы), так и от угла коллокции носителей. В чем то можно констатировать аналогию с латеральным PNP-транзистором, у которого области коллектора расчленены (многоколлекторный транзистор). Таким же образом можно моделировать работу и межкарманного NPN-транзистора, уменьшая его коэффициент усиления пропорционально расстоянию и эффективности коллектора. В зависимости от конкретных топологических решения удавалось совместить расчетные и экспериментальные результаты при значения коэффициента усиления межкарманного NPN-транзистора со значениями от $B = 0,1$ до $B = 0,001$ и выработать соответствующие экспериментные оценки. Для таких чувствительных блоков

преобразователя как источник опорного напряжения, подобные исследования оказались крайне полезными при тюнинге топологического решения.

Выводы

1. Полнота допущений при исследовании минимизации проверялась на соответствие эффекта, вызванного насыщением NPN-транзистора, достигаемого средствами компьютерного моделирования и полученного экспериментальными исследованиями элементной базы и завершенных преобразователей DC/DC на кремниевой пластине.

2. Для учета эффекта насыщения NPN-транзистора при моделировании преобразователей DC/DC схема электрическая дополняется моделями паразитного вертикального PNP-транзистора и горизонтального межкарманного NPN-транзистора.

3. Для каждого паразитного компонента создаются транзисторные модели. В случае оценочных расчетов для паразитных PNP-транзисторов достаточно двух моделей со статическими коэффициентами усиления: а) при отсутствии вертикального коллектора $B = 100$, б) при введении вертикального коллектора $B = 0,1\dots 1$.

4. Для паразитного межкарманного NPN-транзистора необходимо создавать ряд моделей с выбором коэффициента усиления от 0,1 до 0,001 в зависимости от расстояния до тестируемого кармана. Полнота ряда определяется требуемой точностью моделирования.

5. Минимизация влияния паразитных структур достигается не только введением глубокого коллектора, но и топологическими решениями, отдаляющими прецизионные блоки от транзисторов с насыщением и тщательной проработкой заземляющими дорожками областей разделения карманов.

Литература

1. SC4519 - 600kHz, 3A Step-Down Switching Regulator. SEMTECH. Data Sheet. Revision: April 18, 2007.
2. Павлов Л.Н. Работа выходного каскада интегрального импульсного понижающего стабилизатора напряжения. «Электроника и связь». 2007, №1, с.79-80.
3. Павлов Л.Н., Яганов П.А. Минимизация эффекта инжекции в подложку при проектировании выходного каскада преобразователя DC/DC. Электроника и связь. 2009, № 2-3, стр.28-31.