

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382.53.

Ирха В.И., Викулин И.М., Марколенко П.Ю.
Irkha V.I., Vikulin I.M., Markolenko P.Yu.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТИРИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ

THE PHYSICAL MODEL OF MECHANISM OF THE SWITCHING IN THYRISTOR STRUCTURE

Аннотация. Проведена детализация физического механизма включения тиристорной структуры для разработки реалистического критерия эффекта переключения.

Summary. Working out in detail of physical mechanism of the switching in thyristor structure is conducted for development of realistic criterion of switching effect.

подавляющая часть интегральных схем состоит из $p-n-p$ и $n-p-n$ транзисторов, изготовленных в полупроводниковой пластине n - или p -типа. Вследствие этого общей проблемой является возникновение паразитной $p-n-p-n$ структуры, включение которой приводит к выходу схемы из строя. Предотвращение этого эффекта является одной из важнейших задач интегральной схемотехники.

Полупроводниковые $p-n-p-n$ структуры являются основой тиристорных структур, широко применяемых в современной микроэлектронике. Они используются в качестве эффективных переключающих элементов наряду с другими полупроводниковыми приборами, обеспечивающими наибольшее отношение тока во включенном состоянии к току в выключенном состоянии.

Большинство работ [1, 2] посвящено расчету вольт-амперных характеристик (ВАХ) тиристорных структур в зависимости от электрофизических параметров областей, которые в них входят. Однако в этих расчетах не учитывается такая особенность, как работа структур при высоких уровнях инжекции носителей заряда в базе структур. Массовое применение $p-n-p-n$ структуры нашли в мощных тиристорах в качестве управляемых выпрямителей переменного тока. Но методы расчета параметров микротиристорных структур под воздействием внешних излучений развиты довольно слабо.

Цель данной работы состоит в разработке физической модели механизма переключения тиристорной структуры для расчета параметров переключения с учетом высокого уровня инжекции, что позволит выдать рекомендации по разработке способов устранения переключения паразитных $p-n-p-n$ структур в интегральных схемах.

Поскольку основу работы тиристора представляет переключение, то естественным является рассмотрение известных критериев перехода структуры из одного состояния в другое [1]. Для этого использовался критерий переключения идеального полупроводникового вентиля $\alpha_n + \alpha_p = 1$, основанный на рассмотрении $p-n-p-n$ структуры как совокупности двух транзисторов или модели Эберса-Молла [2]. Согласно этому критерию, переключение происходит, когда сумма коэффициентов усиления тока составляющих транзисторов $\alpha_n + \alpha_p \geq 1$. Но эксперименты показывают, что при выполнении этого критерия тиристорная структура еще остается в высокоомном состоянии [3].

При рассмотрении структуры в составе КМОП-ИС были сделаны попытки модификации этого критерия посредством введения в рассмотрение сопротивлений, шунтирующих эмиттерные переходы структуры [4], что позволило объяснить переключение структуры при $\alpha_n + \alpha_p > 1$. Но такой подход носит частный характер и не вносит ясности в существующий механизм переключения. Поэтому детализация физического механизма переключения тиристорной структуры имеет важное как научное, так и практическое значение.

В тиристорной структуре, находящейся в закрытом состоянии, ток определяется обратным током коллекторного перехода, обусловленным переходом неосновных носителей в соответствующие базы, где они являются основными: электронов – в n -базу, дырок – в p -базу [1]. Кроме того, для переключения структуры необходимо, чтобы оба эмиттерных перехода были открыты и, главное, чтобы в структуре реализовалась положительная обратная связь по току.

Открытие одного из эмиттерных переходов связано с накоплением избыточного заряда в одной из баз тиристорной структуры. Как только один из эмиттерных переходов открывается, начинается инжекция неосновных носителей, что в конечном итоге приводит к открытию другого эмиттерного перехода, если оба перехода объединены положительной обратной связью. Отсюда становится понятной определяющая роль обратного тока, от которого зависит величина тока в базах структуры [5]. При подаче прямого напряжения по отношению к эмиттерам на *p-n-p-n* структуру оно в основном падает на коллекторном переходе и, следовательно, в некоторой мере увеличивает обратный ток перехода. Таким образом, обратный ток увеличивает концентрацию основных носителей в базе и способствует дальнейшему смещению эмиттерного перехода в прямом направлении.

Рассмотрение физических процессов включения тиристорной структуры позволяет предположить, что переключение происходит вследствие изменения величины базовых токов структуры. При этом величина базового тока должна оставаться в течение определенного времени достаточной, чтобы вследствие положительной обратной связи ток в структуре достиг величины тока удержания. В этом случае будет наблюдаться самоподдерживающийся процесс переключения. Таким образом, пороговый базовый ток может рассматриваться как мера переключения, т.е. определив его, мы точно сможем сказать, произойдет переключение структуры в высокопроводящее состояние или нет.

Как отмечалось выше, существенной особенностью тиристорных структур является двухэлектродное включение. Но режим работы транзисторов в эквиваленте тиристорной структуры должен принципиально отличаться от режима работы транзисторов при их обычном способе включения: в двухэлектродной тиристорной структуре они работают в режиме с оторванной базой. А это приводит к нарушению электронейтральности базовых областей структуры, что очень часто встречается в КМОП-ИС.

В теории *p-n-p-n* структуры в двухэлектродном включении, основанной на транзисторном подходе, в качестве физической модели принят транзисторный эквивалент *p-n-p-n* структуры на *p-n-p* и *n-p-n* транзисторах [2]. При этом используются транзисторные параметры, которые изменяются при трехэлектродном включении транзистора, когда потенциал базы фиксирован и выполняется условие ее квазинейтральности. В *p-n-p-n* структуре (рис. 1,а), равно как и в ее транзисторном эквиваленте (рис. 1,б,в), потенциалы баз плавающие и условие нейтральности в них не выполняется. Поэтому *p-n-p-n* структура и ее транзисторный эквивалент не могут быть описаны транзисторными параметрами, измеренными при трехэлектродном включении транзисторов, входящих в транзисторный эквивалент *p-n-p-n* структуры.

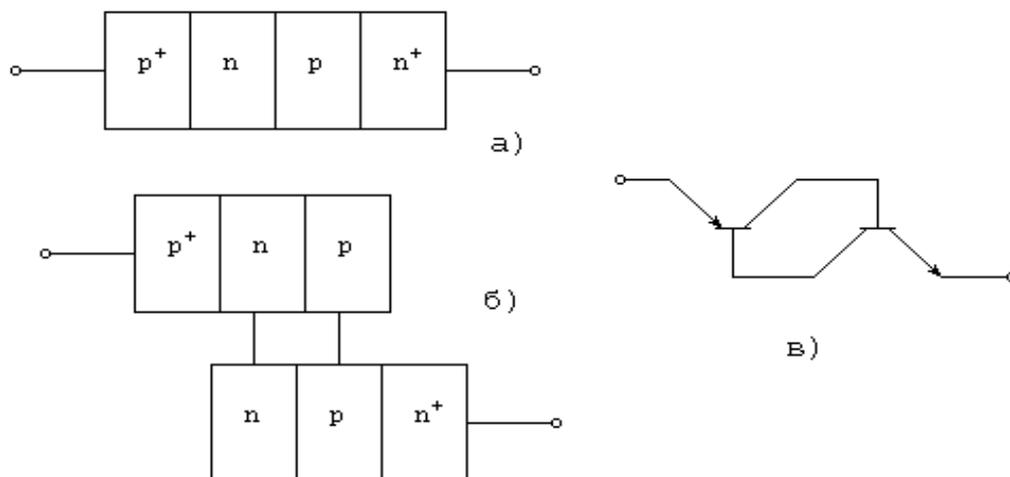


Рисунок 1 – *P-n-p-n* структура (а) и ее транзисторный эквивалент (б и в)

Применительно к транзистору в двухэлектродном включении (с плавающим потенциалом базы или с оторванной базой), имеющему участок отрицательного сопротивления на ВАХ, критерий

$$M \cdot \tilde{\alpha} \geq 1 \quad (1)$$

ввел Молл [6], где M – коэффициент умножения носителей; $\tilde{\alpha}$ – дифференциальный коэффициент усиления транзистора по току. Но при этом

$$\tilde{\alpha} = \alpha + \frac{\partial \alpha}{\partial I} I, \quad (2)$$

где I – величина тока, а α – коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общей базой, т.е. транзистора при трехэлектродном включении, когда потенциал базы фиксирован и выполняется условие квазинейтральности в базе. Для случая плавающего потенциала в базе имеет место накопление в ней основных носителей заряда и нарушение электронейтральности.

Следующий фактор, который необходимо учитывать, – это физическая природа тока насыщения коллектора. Применительно к p - n - p - n структуре и ее транзисторному эквиваленту (см. рис. 1) с учетом умножение в коллекторе

$$I = \frac{M \cdot I_{\text{ко}}}{1 - M(\alpha_p + \alpha_n)}. \quad (3)$$

Тогда условием появления участка отрицательного сопротивления (ОС) на ВАХ p - n - p - n структуры в двухэлектродном включении будет:

$$M \cdot (\tilde{\alpha}_p + \tilde{\alpha}_n) > 1, \quad (4)$$

где

$$\tilde{\alpha}_p = \alpha_p + \frac{\partial \alpha_p}{\partial I} I; \quad \tilde{\alpha}_n = \alpha_n + \frac{\partial \alpha_n}{\partial I} I. \quad (5)$$

Коэффициент усиления транзистора по току в схеме с общей базой (в нашем случае α или α_p и α_n) зависит от тока и напряжения на коллекторе, так как при увеличении напряжения на коллекторном p - n переходе расширяется его область пространственного заряда и уменьшается ширина базовой области. Следовательно, ток насыщения коллектора $I_{\text{ко}}$ должен уменьшиться и при $\alpha \cdot M = 1$, равно как и при $M \cdot (\alpha_p + \alpha_n) = 1$, стать тождественно равным нулю.

При $T = \text{const}$ ток насыщения $I_{\text{ко}} = \text{const}$ и от тока, а также практически и от напряжения не зависит. Кроме того, как только примем $I_{\text{ко}} = \text{const} = C$, становится правомерным выражение, полученное в [2] для ВАХ структуры, так как в этом случае имеем $I = C / (1 - \alpha_p - \alpha_n)$ – выражение, практически не зависящее от напряжения и верное лишь для некоторых значений тока [7].

Критерий (4) предполагает, что до участка ОС на ВАХ p - n - p - n структуры $\alpha_p + \alpha_n < 1$, в начале участка ОС $\alpha_p + \alpha_n = 1$, а на самом участке ОС $\alpha_p + \alpha_n > 1$. Поскольку p - n - p - n структура – двухэлектродная и не содержит выводов к базам, то, в соответствии с условием непрерывности тока в ней, в каждом сечении протекает один и тот же ток. В связи с этим при $I_{\text{ко}} = \text{const}$, условие $\alpha_p + \alpha_n < 1$ может иметь место только в приборе, имеющем более двух выводов. Оно означает, что ток на входе меньше тока на выходе и должен быть дополнительный сток для тока, т.е. дополнительный вывод. Условие $\alpha_p + \alpha_n > 1$ также может выполняться только в структуре с числом выводов более двух. Следовательно, в двухэлектродном включении при любом значении протекающего через структуру тока должно выполняться условие $\alpha_p + \alpha_n = 1$, где α_p и α_n – коэффициенты передачи дырочной и электронной составляющих тока, протекающего через коллектор p - n - p - n структуры. При этом α_p и α_n – это уже не транзисторные параметры и их нельзя заимствовать из справочников для транзисторов или измерять при трехэлектродном включении транзисторов.

Таким образом, корректность общепринятой теории p - n - p - n структуры, базирующейся на транзисторном подходе, и полученного на ее основе критерия $\tilde{\alpha}_p + \tilde{\alpha}_n \geq 1$ вызывает сомнения и при экспериментальной проверке не выполняется. Сумма коэффициентов усиления по току транзисторов, входящих в транзисторный эквивалент p - n - p - n структуры, становится значительно больше единицы при напряжении, существенно меньшем напряжения включения.

Отказы работы КМОП-схем происходят потому, что в них за счет непредусмотренного включения составляющих их тиристорных структур происходит защелкивание входных и выходных цепей.

Главной особенностью КМОП-схем является наличие в них комплементарных пар МОП-транзисторов с низкой потребляемой мощностью. Дальнейшего понижения рабочего напряжения и

повышения быстродействия можно достичь путем уменьшения геометрических размеров элементов интегральных схем. Но при этом будет увеличиваться вероятность переключения паразитной $p-n-p-n$ структуры, т.е. образования канала высокой проводимости между полюсами источника питания, потребляемого КМОП-структурой, что может привести к ее разрушению. Поэтому эффект переключения является одной из основных проблем, ограничивающей создание КМОП БИС с субмикронными размерами элементов.

Паразитная тиристорная структура состоит из вертикального и горизонтального биполярных транзисторов, которые формируются в процессе изготовления интегральных схем и, следовательно, не могут быть исключены на этой стадии. Таким образом, эффект переключения наблюдается только в тех структурах $p-n-p-n$ типа, которые характеризуются наличием участка ОС на ВАХ при двухэлектродном включении. Причиной появления участка ОС на ВАХ является действие положительной обратной связи по току. Поэтому наличие корректной модели $p-n-p-n$ структуры, которая описывает как механизм обратной связи, так и наблюдаемую задержку перед переключением из высокоомного состояния в низкоомное, представляет несомненный интерес для схемотехники.

Таким образом, полученные зависимости электрических параметров переключения $p-n-p-n$ структур от электрофизических параметров материала и внешних электрических полей могут быть использованы при расчете конструкций промышленных тиристоров и интегральных схем с их применением. Учет концентрации инжектированных носителей позволил установить, что они существенно влияют на размеры области объемного заряда коллектора $p-n-p-n$ структуры. Это дает возможность изменять напряжение переключения путем определенного подбора электрофизических параметров p и n областей.

Литература

1. *Гаряинов С.А., Тиходеев Ю.С.* Физические модели полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением. – М.: Радио и связь, 1997. – 276 с.
2. *Викулин И.М., Стафеев В.И.* Физика полупроводниковых приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
3. *Латышонок А.Н., Марколенко Ю.К., Шевцов Н.Н.* Экспериментальное исследование явления "защелкивания" $p-n-p-n$ структур на основе транзисторного эквивалента // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 1989. – Вып. 3 (132). – С. 7–10.
4. *Li W., Nokali M.E.* A new model for CMOS latch-up // Solid Stat. Electron. – 1987. – V. 30. – № 8. – P. 885-887.
5. *Марколенко Ю.К., Викулин И.М., Марколенко П.Ю.* Пороговый базовый ток переключения $p-n-p-n$ структуры // Фотозлектроника.— 1999. – Вып. 8. – С. 104-106.
6. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – Кн.1. – 455 с.
7. *Марколенко Ю.К., Латышонок А.Н., Шевцов Н.Н.* Анализ физических моделей явления "защелкивания" в КМОП БИС // Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. – 1989. – Вып.1(73). – С. 13-17.