

## 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.

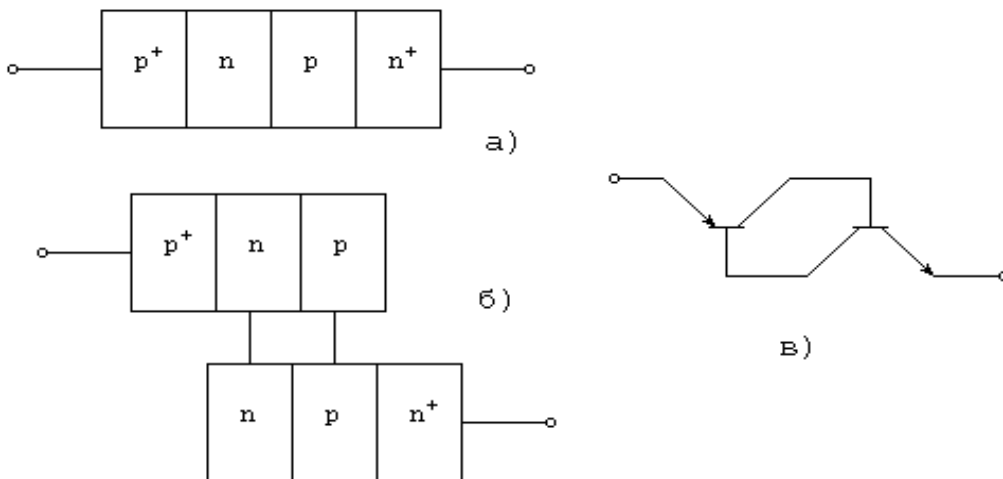


Рисунок 1 –  $P-n-p-n$  структура (а) и ее транзисторный эквивалент (б и в)

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  $\alpha$  – 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  $\alpha$  или  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$ ) 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  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  – коэффициенты передачи дырочной и электронной составляющих тока, протекающего через коллектор  $p-n-p-n$  структуры. При этом  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  – 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 тиристорных 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.