

## ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382.3

Ирха В.И., Марколенко П.Ю., Петренко Н.Л.  
Irkha V.I., Markolenko P.Yu., Petrenko N.L.

### РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ ТИРИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ

### CALCULATION OF INFLUENCE OF MOBILE CARRIERS OF THE CHARGE ON PROCESS INCLUSIONS ТИРИСТОРНОЙ OF STRUCTURE

**Аннотация.** Рассмотрено влияние подвижных носителей заряда в области пространственного заряда коллекторного перехода на процесс включения тиристорной структуры.

**Summary.** Influencing of mobile charge in area of spatial charge of collector transition on the process of switching in thyristor structures is considered.

Большинство интегральных схем состоит из  $p-n-p$  и  $n-p-n$  транзисторов, изготовленных в полупроводниковой пластине  $n$ - или  $p$ -типа. Следовательно, 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.

Структуры  $p-n-p-n$  типа являются основой современных тиристоров. Они используются в качестве эффективных переключающих элементов, обеспечивающих наибольшее отношение тока во включенном состоянии к току в выключенном состоянии. Главной особенностью таких структур является переход при определенных условиях из закрытого (высокоомного) состояния в открытое (низкоомное) состояние. Переключение тиристорной структуры из закрытого состояния в открытое по своей природе является переходным процессом. При переходном процессе токи и напряжения в структуре меняются в значительных пределах и уровень инжекции неосновных носителей заряда в базовых областях изменяется от малого до большого. Множество работ посвящено расчету вольтамперных характеристик тиристорных структур в зависимости от электрофизических параметров областей, которые в них входят. В работах [1 ... 3] исследован динамический процесс включения  $p-n-p-n$  структуры с учетом высокого уровня инжекции и определено пороговое значение базового тока, приводящего к переключению структуры в открытое состояние.

Существенной особенностью  $p-n-p-n$  структур является режим двухэлектродного включения. Необходимо отметить, что эффект защелкивания наблюдается только в тех структурах, которые характеризуются наличием участка отрицательного дифференциального сопротивления на вольтамперной характеристике при таком включении. Это свидетельствует о том, что структура управляется током с наличием внутренней положительной обратной связи [4].

Обычно защелкивание объясняется влиянием шунтирующих сопротивлений подложки и кармана интегральной схемы и зависимостью от величины коэффициентов усиления тока паразитных транзисторов [5], что удобно для некоторых схемных решений. Но при этом трудно объяснить наблюдаемую задержку перед переключением структуры из высокоомного в низкоомное состояние. Как указывалось в работах [4, 6], существенную роль в защелкивании должна играть область пространственного заряда (ОПЗ) коллекторного перехода структуры. Однако в цитируемых выше работах не учитывается такая особенность, как влияние подвижных носителей заряда в области пространственного заряда коллекторного перехода на процесс включения тиристорной структуры. Поэтому целью данной работы является выяснение влияния подвижных носителей заряда на поле ОПЗ коллекторного перехода, а следовательно, и на процесс включения тиристорной структуры.

Как следует из [2], включение тиристорной структуры связано с обратным током коллекторного перехода. В случае управления структурой посредством полевого электрода включение ее индуцируется увеличением обратного тока из-за шунтирования коллекторного перехода [1].

Рассмотрим, как изменяется напряжение на коллекторном переходе  $U_K$  с учетом влияния подвижных носителей на электрическое поле его ОПЗ. Считаем обратносмещенный переход резким и ось  $x$  направим по направлению тока в структуре. Тогда уравнение Пуассона имеет вид

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\delta}{\varepsilon\varepsilon_0}, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;  $\delta$  – плотность объемного заряда;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная. Плотности электронного  $j_n$  и дырочного  $j_p$  токов определяются выражениями

$$j_n(x) = q \cdot n(x) \cdot v_n, \\ j_p(x) = q \cdot p(x) \cdot v_p,$$

где  $q$  – абсолютный заряд электрона;  $n(x)$  и  $p(x)$  – концентрации подвижных электронов и дырок;  $v_n$  и  $v_p$  – дрейфовые скорости электронов и дырок (полагаем  $v_n = v_p = v$ ). При этом плотность объемного заряда в ОПЗ коллекторного перехода будет иметь значение

$$\delta = \begin{cases} -q \cdot N_A + \frac{\Delta}{v}, & 0 < x < l_p, \\ q \cdot N_D + \frac{\Delta}{v}, & -l_n < x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $N_A, N_D$  – концентрации ионизированных акцепторов и доноров;  $\Delta = j_p - j_n$ . Вне ОПЗ  $\delta = 0$ .

Интегрируя уравнение (1) с учетом (2) и граничных условий:  $E_p(x) = 0$  при  $x = l_p$ ,  $E_n(x) = 0$  при  $x = -l_n$  и  $E_p(x) = E_n(x)$  при  $x = 0$ , получим:

$$E_p(x) = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \left( -qN_A + \frac{\Delta}{v} \right) \cdot (x - l_p), \\ E_n(x) = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \left( qN_D + \frac{\Delta}{v} \right) \cdot (x + l_n),$$

где  $E_p(x)$  и  $E_n(x)$  – распределения электрического поля в приграничных слоях перехода.

С учетом  $E(x) = -\frac{dU(x)}{dx}$  находим распределение потенциала. Отсчет потенциала будем вести от слоя полупроводника  $n$ -типа. После интегрирования с учетом граничных условий: при  $x = l_p$ ,  $U(x) = U_k$  и при  $x = -l_n$ ,  $U(x) = 0$  получим распределения потенциала  $U_p(x)$  и  $U_n(x)$  в  $p$ - и  $n$ -областях ОПЗ. Считая  $U_p(x) = U_n(x)$  при  $x = 0$  находим падение напряжения на коллекторном переходе

$$U_k = \frac{1}{2\varepsilon\varepsilon_0} \left[ \left( qN_A - \frac{\Delta}{v} \right) \cdot l_p^2 + \left( qN_D + \frac{\Delta}{v} \right) \cdot l_n^2 \right]. \quad (3)$$

Из (3) с учетом соотношений между  $l_p$  и  $l_n$ , когда  $E_p(x) = E_n(x)$  при  $x = 0$ , определим ширину ОПЗ  $x_n = l_p + l_n$ :

$$x_n = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (N_A + N_D)(q \cdot v)^2}{q (qN_D v + \Delta)(qN_A v - \Delta)} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Полагая в (2)  $\Delta = 0$  можно исключить влияние подвижных носителей заряда. Тогда выражения для падения напряжения на коллекторном переходе  $U_{ко}$  и ширины ОПЗ  $x_0$ , соответствующие началу действия механизма положительной обратной связи, имеют вид:

$$U_{ко} = \frac{qN_A}{2\varepsilon\varepsilon_0} \cdot l_p'^2 + \frac{qN_D}{2\varepsilon\varepsilon_0} \cdot l_n'^2, \quad (5)$$

$$x_0 = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (N_A + N_D)}{q N_D \cdot N_A} U_{ко} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где  $l_p'$  и  $l_n'$  отличаются от  $l_p$  и  $l_n$ .

Для нахождения вклада при падении напряжения на коллекторном переходе, обусловленного подвижными носителями заряда, находим зависимость  $U_K$  от  $U_{ко}$ . Пусть  $l'_p > l'_n$ , если  $j_p > j_n$  или  $\Delta > 0$ , то в  $p$ -области ОПЗ получим избыток положительного заряда по сравнению с  $n$ -областью и  $\Delta l'_p > \Delta l'_n$ .

В работе [7] показано, что подача напряжения положительной полярности на  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структуру ведет к смещению коллекторного перехода в обратном направлении и расширению ОПЗ. Поскольку в нашем случае процесс нейтрализации ионизированных атомов акцепторной примеси идет быстрее, чем рост положительного заряда в  $n$ -области ОПЗ (соответствует смещению коллекторного перехода в прямом направлении), то можно считать, что  $p$ -область, по крайней мере, не увеличивается, и полагать  $l'_p$  постоянной. И для удовлетворения условия равенства зарядов в  $p$ - и  $n$ -областях перехода  $\left(N_A - \frac{\Delta}{qv}\right) \cdot l'_p = \left(N_D + \frac{\Delta}{qv}\right) \cdot l'_n$  необходимо уменьшить  $n$ -область на  $\Delta l'_n$ . При этом получаем необходимую связь между  $U_K$  и  $U_{ко}$  и из (4) получаем  $x_n$ . С учетом (3) и (5) при граничных условиях  $E_p(x) = E_n(x)$  ( $x = 0$ ), находим выражения для  $l_p$  и  $l'_p$ . Из их равенства получаем

$$U_K = \frac{N_D}{N_A} \cdot \frac{(qvN_A - \Delta)U_{ко}}{qvN_D + \Delta}. \quad (7)$$

Тогда

$$x_n = x_0 \cdot \frac{qvN_D}{qvN_D + \Delta}. \quad (8)$$

Поскольку при  $\Delta > 0$  коэффициент при  $x_0$  меньше единицы, то  $x_n < x_0$  и ОПЗ сужается. При  $\Delta = 0$   $x_n = x_0$ . Если  $j_n > j_p$  ( $\Delta < 0$ ), то из (8) следует, что ОПЗ будет расширяться при  $l'_p > l'_n$ .

Когда  $l'_p < l'_n$  и  $j_n > j_p$  ( $\Delta < 0$ ), то инжектируемые электроны будут нейтрализовать ионизированные атомы донорной примеси и в  $n$ -области возникнет избыток отрицательного заряда подвижных носителей по сравнению с  $p$ -областью ОПЗ. Полагая границу  $l'_n$  неподвижной, получим:

$$U_K = \frac{N_A}{N_D} \cdot \frac{(qvN_D + \Delta)U_{ко}}{qvN_A - \Delta}, \quad (9)$$

$$x_n = x_0 \cdot \frac{qvN_A}{qvN_A - \Delta}. \quad (10)$$

Из (10) следует (так как  $\Delta < 0$ ), что ОПЗ сужается, т.е. уменьшается падение напряжения на коллекторном переходе. На вольтамперной характеристике будет формироваться участок отрицательного дифференциального сопротивления. При  $j_p > j_n$  и  $l'_n > l'_p$  ширина ОПЗ растет.

Как следует из анализа выражений (8) и (10), расширение ОПЗ будет достигаться при выполнении  $j_p > j_n$  и  $l'_n > l'_p$ , а также  $j_n > j_p$  и  $l'_p > l'_n$ . Поскольку в этих случаях не реализуется механизм положительной обратной связи по току, то, следовательно, исключается переключение  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структуры. Таким образом, исключить вероятность защелкивания тиристорной структуры можно либо путем одинакового легирования базовых областей  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структуры (что приведет к ухудшению пороговых характеристик транзисторов), либо посредством создания градиентов концентрации примеси, направленных к металлургической границе коллекторного перехода. Следовательно, учет влияния подвижных носителей заряда в ОПЗ коллекторного перехода на процесс включения тиристорной структуры представляет несомненный интерес для схемотехники и может быть использован при расчете конструкций промышленных тиристоров и интегральных схем с их применением, так как они существенно влияют на размеры ОПЗ коллектора  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структуры.

В заключение необходимо отметить, что при компенсации ионизированных примесей подвижными носителями заряда, с одной стороны, металлургической границы коллекторного  $p$ - $n$  перехода и одновременном увеличении заряда, с другой, с неизбежностью происходит расширение ОПЗ в сторону области, где происходит компенсация заряда. Рост заряда и его компенсация идут с различной интенсивностью, так как обычно области баз легированы не одинаково. В

слаболегированной базе ширина ОПЗ больше и, если в этой области происходит компенсация заряда, то она должна идти быстрее, чем рост заряда в соседней области. Это в свою очередь приведет к уменьшению падения напряжения на коллекторном переходе и сужению ОПЗ. Если компенсация заряда будет происходить в сильнолегированной базе, то результатом будет расширение ОПЗ. Все это дает возможность объяснить причины, приводящие к переключению тиристорной структуры, и определить эффективные пути его предотвращения.

### **Литература**

1. *Марколенко Ю.К., Марколенко П.Ю.* Особенности переключателей на основе *p-n-p-n* структур // Наукові праці УДАЗ ім. О. С. Попова. – 2001. – № 1. – С. 15-17.
2. *Марколенко Ю.К., Марколенко П.Ю.* Критический базовый ток переключения *p-n-p-n* структуры // Системы и средства передачи и обработки информации: Материалы международной научно-практ. конф. – Одесса, 1997. – С. 50.
3. *Викулин И.М., Ирха В.И., Марколенко П.Ю.* Расчет параметров переключения *p-n-p-n* структуры с учетом высокого уровня инжекции // Обробка сигналів і негауссівських процесів: Тези доповідей міжнародної наук.-практ. конф. – Черкаси, 2007. – С. 214-216.
4. *Гаряинов С.А., Горяинов А.С., Плешко Б.К.* Обобщенная модель *p-n-p-n*-структуры // Электронная техника. – Сер. 3. Микроэлектроника, 1987. – Вып. 4, 124. – С. 57-67.
5. *Rung R.D., Motose H.* DC holding and dynamic triggering characteristics of bulk CMOS latchup// IEEE Trans. Electron Dev. – 1983. – V. 30, №12. – P. 1647-1655.
6. *Ирха В.И., Викулин И.М., Марколенко П.Ю.* Физическая модель механизма переключения тиристорной структуры// Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. – № 1. – С. 74-77.
7. *Hu G.J.* A better understanding of CMOS latchup// IEEE Trans. Electron Dev. – 1984. – V. 31. – № 1. – P. 62-67.