

УДК 62 1. 315.592

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТА ЗАЩЕЛКИВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

С.М. Гадоев

Исследовано изменение важнейших параметров эффекта защелкивания комплементарных металл-окисел полупроводниковых интегральных схем (КМОП ИС). С помощью этой модели можно достаточно адекватно прогнозировать температурные зависимости параметров эффекта в КМОП ИС структурах, что позволяет рекомендовать их для исследования систем автоматизации проектирования (САПР) КМОП ИС.

*Ключевые слова:* структура; ток удержания; эффект; микросхема; температура; защелкивание.

## TEMPERATURE DEPENDENCE OF PARAMETERS OF EFFECT LATCH-UP OF INTEGRATED MICROCIRCUITS

S.M. Gadoev

The article considers change of parameters of effect latch-up complementary metal-oxide of the semiconductor integrated circuits (CMOS IS). By means of this model it is possible to predict adequately enough temperature dependences of parameters of effect in CMOS IS structures that allows to recommend than for research in structure (SAPR) CMOS IS.

*Keyword:* structure; holding; current; the effect; chip; temperature; latch-up.

Одним из основных паразитных эффектов в КМОП ИС является срабатывание четырехслойных структур, происходящее под действием электрического перенапряжения или ионизации [1].

Существенное влияние температуры на этот эффект требует разработки модели защелкивания, адекватной при высоких температурах. В качестве основы для разработки модели электрического уровня взята двухтранзисторная эквивалентная схема [2, 3].

Анализ модели показывает, что существенное влияние на параметры защелкивания оказывают такие характеристики физического уровня описания, как время жизни неравновесных носителей  $t$ , коэффициент диффузии  $D$ , ширина обедненного слоя р-п перехода  $W_p$ , которые в свою очередь определяют температурные характеристики таких электрических параметров, как напряжение отпираания р-п перехода  $U_{отп}$ , коэффициент передачи тока базы транзистора  $b_{ср}$ , сопротивления областей полупроводника, ионизационный ток  $I_{фк}$ , если защелкивание имеет ионизационную природу. С целью определения температурных зависимостей перечисленных параметров была проведена серия теоретических и экспериментальных исследований на

тестовых КМОП структурах. На рисунке 1 приведен график экспериментальной и расчетной зависимостей времени жизни носителей “карман-подложка” тестовой схемы серии КИТ-1. Видно, что время действительно растет с ростом температуры, как это следует из положений теории [4]:

$$\tau \sim \sqrt{m_n / 2k \cdot T},$$

где  $m_n$  – эффективная масса электрона в кристалле полупроводника (для  $Si$   $m_n = 1,6+1,8$ ).



Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость времени жизни носителей от температуры в переходе “карман-подложка” тестовой схемы (— эксперимент, ---- расчет)

При этом время жизни в диапазоне температур 210К, 400К изменяется по закону  $t \sim T$ , однако при более высоких температурах – 360К, 420К, как  $t \sim T^{1/4}$ .

Увеличение времени жизни носителей с ростом температуры можно объяснить тем, что в полупроводнике n-типа (Si) с ростом температуры фононы все более и более ионизируют ловушки, срывая с них электроны. Сходимость экспериментальных данных с теоретическими, как видно на рисунке 1, в диапазоне 210, 400К находится в пределах от 0,6 до 1,6  $\mu\text{s}$  в переходе “карман-подложка” тестовой схемы.

Для определения температурной зависимости таких параметров электрического уровня, как  $b_{cr}$ ,  $I_{фк}$ ,  $R$  необходимо также знать поведение диффузионной длины, зависящей от времени жизни и коэффициента диффузии (подвижности) [5]:

$$L = \sqrt{dt} = \sqrt{\varphi_T \mu(T) \tau(T)} \cong \sqrt{\frac{K \mu_0 T_0^{3/2}}{q} \alpha T^{1/4}},$$

где  $\alpha = 6 \cdot 10^{-3}$  мкс/град. (постоянный коэффициент);  $m_0 = 1,2 \times 10^{-8}$  Гн/см<sup>1</sup>

Это выражение справедливо в интервале температуры 290, 450К. Учитывая, что коэффициент передачи тока базы зависит от коэффициента переноса носителей  $\chi$  и коэффициента инжекции эмиттерного перехода  $j$  как

$$\beta_{co} = \frac{x_j}{1 - x_j},$$

где  $x_j = \frac{1}{chw_s / L}$ , то можно получить температурные зависимости  $\beta_{ст}$  на двух участках температур:

$$\beta_{no} = \left[ \left( 1 + bT^{1/4} \right) ch \frac{W_\delta}{\alpha T^{1/4}} - 1 \right]^{-1},$$

где  $\alpha = \sqrt{\frac{K \mu_0 T_0^{3/2}}{q}}$ ,  $b = \frac{\delta_n}{\delta_p} \cdot \frac{W_8}{\sqrt{\frac{K \mu_0 T_0^{3/2}}{q} \alpha}}$

На рисунке 2 видно, что коэффициент передачи тока базы транзистора растет в диапазоне температур 210–400К до 57. Измерение проводили в тестовой схеме в статистическом режиме.

Аналогично должен вести себя и ионизационный ток, определяемый диффузионной длиной, что подтверждает график на рисунке 3, измеренный для перехода “карман-подложка” тестовой структуры.

С целью экспериментальной проверки адекватности разработанной модели была проведена серия экспериментов по измерениям температурной зависимости тока и напряжения удержания ИС К176ЛГИ, К564ПУ4.

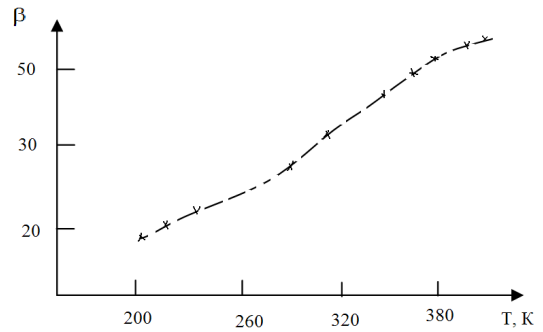


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость коэффициента передачи тока базы транзистора от температуры в тестовой схеме: 200К = 18; 300К = 35; 400К = 58

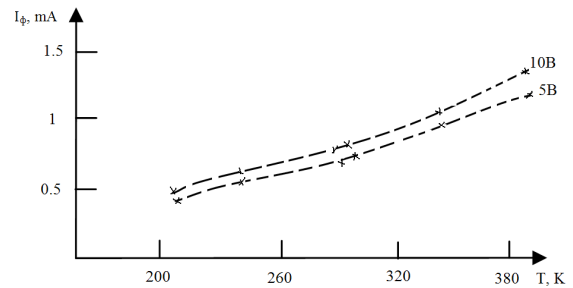


Рисунок 3 – Зависимость первичного фототока от температуры р-п перехода “карман-подложка” (тестовая схема)

Расчеты по модели верно предсказывают характер температурного изменения параметров защелкивания паразитных структур КМОП ИС. Структурная схема эксперимента представлена на рисунке 4. Исследуемая ИС размещена в контактирующем устройстве, обеспечивающем контакт данной стороны корпуса ИС с нагревательным элементом (в диапазоне 210–400К), который позволяет проводить облучение с поверхностной стороны кристалла. Контроль температуры осуществляется на поверхности нагревательного элемента посредством термопары.

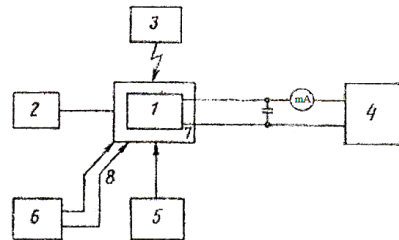


Рисунок 4 – Схема экспериментального стенда: 1 – ИС; 2 – осциллограф; 3 – лазер; 4 – источник питания; 5 – нагревательный элемент; 6 – микровольтметр; 7 – термостат; 8 – термопара

Таким образом, с помощью разработанной модели можно достаточно адекватно прогнозировать температурные зависимости параметров защелкивания паразитных КМОП структур, что позволяет рекомендовать их для использования в составе САПР КМОП ИС. Упрощенный вариант модели, учитывающий только изменение напряжения отпирания р-п-переходов, может быть использован для оценочных расчетов.

#### *Литература*

1. *Гадоев С.М.* Температурная зависимость параметров физического уровня паразитных 4-слойных структур КМДП ИМС / С.М. Гадоев // Матер. межд. конф. по физике конденсированного состояния и экологических систем. ФТИ им. Умарова АН РТ. Душанбе, 2002. С. 59–61.
2. *Гадоев С.М.* Эффект защелкивания в комплементарных металл–окисел–полупроводник интегральных микросхемах / С.М. Гадоев // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 2. С. 58–61.
3. *Гадоев С.М.* Исследование влияния лазерного излучения на параметры 4-слойных КМДП ИМС / С.М. Гадоев // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 3. С. 44–48.
4. *Гафуров О.В.* Радиационное дефектообразование и энергетический спектр, образующийся в п- и р-кремнии при облучении альфа-частицами и нейтронами / О.В. Гафуров, Т.А. Ходжаев, С.М. Гадоев // ТДУ. Вестник. 2014. № 1. Дангара. С. 16–20.
5. *Гадоев С.М.* Особенности технического и математического обеспечения средств контроля интегральных схем при воздействии различных дестабилизирующих факторов / С.М. Гадоев, О.В. Гафуров // Наука и инновация. Душанбе, 2014. № 1. С. 69–71.