

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР

д.ф.-м.н. А.К. Гнап, к.т.н. Н.И. Коваленко,  
Е.Ф. Храмов, Г.В. Прохоров

*Приведены результаты моделирования, расчета и сравнения с экспериментальными зависимостями влияния высокоэнергетического облучения на частотные свойства транзисторных структур, изготовленных по различным технологиям.*

Влияние облучения на изменение характеристик полупроводниковых приборов исследовалось авторами ряда работ [1]. Ими рассмотрено изменение коэффициента усиления и величины обратного тока коллектора транзисторов при воздействии нейтронов и гамма-излучения. Показано, что возрастают исходное сопротивление и коэффициент обратной связи транзистора в схеме включения с общей базой, а выходное сопротивление монотонно падает, пропорционально интегральному потоку быстрых нейтронов. При облучении нейтронами [2] наблюдается также увеличение граничной частоты усиления по току для сплавных транзисторов, включенных по схеме с общим эмиттером.

Ниже приведены результаты теоретических исследований воздействия высокоэнергетических частиц на частотные характеристики полупроводниковых триодов и их сравнение с экспериментом. Изложено модельное представление для определения возможного изменения частотных параметров сплавных, диффузионных, диффузионно - сплавных и планарных транзисторов интегральных схем при работе в условиях облучения высокоэнергетическими частицами вследствие радиационно - стимулированной диффузии.

Обычно для определения частотных свойств транзисторов и при расчете электронных схем используют граничные и предельные частоты, характеризующие изменения (с изменением частоты) параметров, определяющих усилительные свойства транзисторов. Граничные частоты усиления по току  $f_\alpha$  и  $f_\beta$  определяются как частоты, для которых  $\alpha$  или  $\beta$ , соответственно, снижаются в корень из двух раз относительно своих значений на низкой частоте.

Предельная частота  $f_{max}$  определяется как частота, на которой функция  $\nu$  (коэффициент усиления по мощности) равна единице.

Одной из основных характеристик для оценки частотных свойств транзисторов является частота коэффициента передачи тока  $f_\alpha$  в схеме с

общей базой, которая определяется по частотной зависимости  $\alpha$ . Зависимость для  $\alpha$  определяется сдвигом по фазе. Сдвиг по фазе имеет место из-за конечного времени пролета и уменьшения модуля за счет размывания сигнала и рекомбинаций.

В бездрейфовом транзисторе время пролета и размывание сигнала определяется диффузией носителей и величиной градиента концентрации примеси, от которой зависит как скорость диффузионного перемещения носителей, так и размывание сигнала.

В дрейфовом транзисторе частотная зависимость определяется как дрейфом, так и диффузией носителей.

Частотная зависимость транзисторов с граничными частотами  $f_\alpha$  порядка единиц мегагерц определяется практически только временем пролета носителей. Для транзисторов с граничными частотами  $f_\alpha$  порядка 100 мГц частотная зависимость коэффициента усиления по току  $\alpha$  определяется не только временем пролета носителей в базе, но емкостями переходов, омическими сопротивлениями базы и коллектора.

Предельная частота эмиттерной цепи для триодных структур определяется выражением

$$f_3 = \frac{1}{2\pi r_3 C_3}, \quad (1)$$

а предельную частоту коллекторной цепи можно определить по формуле

$$f_k = \frac{1}{2\pi r_6' C_k}. \quad (2)$$

где  $r_3$  – сопротивление эмиттера;  $r_6'$  – омическое сопротивление базы;  $C_3$  – емкость эмиттерного перехода;  $C_k$  – емкость коллекторного перехода.

Связь между граничной частотой, током эмиттера и диффузионной емкостью эмиттера запишется в виде

$$f_\alpha = \frac{qI_3}{2\pi kTC_{д.э.}}. \quad (3)$$

Здесь  $I_3$  – ток эмиттера;  $q$  – величина заряда электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура,  $C_{д.э.}$  – диффузионная емкость эмиттерного перехода.

Одним из параметров транзистора является частота, на которой коэффициент усиления по мощности равен единице. В этом случае транзистор может работать в схеме генератора. Поэтому максимальная частота усиления по мощности равна максимальной частоте генерации транзистора

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha f_\alpha}{30 r_6' \cdot C_k}}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (1), предельные частоты, определяемые цепью эмиттера и коллектора, а также граничная частота коэффициента передачи

по току  $f_{\alpha}$  определяются в основном емкостями переходов. Используя ранее приведенные зависимости для определения емкости эмиттерного и коллекторного переходов, с учетом распределения примесей в условиях облучения для различных технологий производства транзисторов [3]:

$$C'_3(\Phi) = S_3 \left\{ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 g(x_2 - x_1)}{12(\varphi_k - u_3) 4D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}}} \right\}^{\frac{1}{3}}; \quad (5)$$

$$C'_k(\Phi) = S_k \left\{ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 g(x_2 - x_1)}{12(\varphi_k - u_3) 4D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}}} \right\}^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

Здесь  $C'_k(\Phi)$  – емкость коллекторного перехода для диффузионного транзистора, как функция интегрального потока;  $C'_3(\Phi)$  – емкость эмиттерного перехода, как функция величины интегрального потока;  $q$  – заряд электрона;  $f_k$  – высота потенциального барьера, определяемая выражением

$$\varphi_k = \frac{kT}{g} \ln \frac{\rho_p \mu_p (\epsilon + 1)^2}{\rho_p \rho_n \mu_n}, \quad (7)$$

где  $L_n = \mu_n / \mu_0 = 2,1$ ;  $u$  – напряжение смещения на коллекторном переходе;  $u$  – напряжение смещения на эмиттерном переходе.

Для сплавных структур емкости переходов при облучении с учетом зависимости (5,6) равны:

$$C''_3 = S_3 \sqrt{\frac{A}{2(\varphi_k - u_3)}}; \quad (8)$$

$$C''_k = S_k \sqrt{\frac{A}{2(\varphi_k - u_k)}}, \quad (9)$$

где  $A = \epsilon\epsilon_0 g N_{03} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}}}}$ ;  $C''_3(\Phi)$  – емкость эмиттерного

перехода, как функция интегрального потока сплавных транзисторов;  $C''_k(\Phi)$  – емкость коллекторного перехода;  $N_{ок}$  – концентрация донорской примеси в базе у коллектора;  $N_{оэ}$  – возле эмиттера;  $\Phi$  – интегральный поток.

Подставляя их в выражения (1 - 3), мы получим формулы для определения граничных частот транзисторов при воздействии высокоэнергетического облучения.

**Диффузионные транзисторы.** При облучении ускоренными частицами диффузионных транзисторов, структура и распределение примесей в которых схематически представлены на рис. 1, предельная частота эмиттерной цепи с учетом зависимости (5) запишется как

$$f'_3(\Phi) = \frac{1}{2\pi r_3 C'_3(\Phi)} = \frac{1}{2\pi r_3 S_3} \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 g(x_2 - x_1)}{12(\varphi_k - u_3) 4D'(\Phi)} \right]^{-1/3} \quad (10)$$

Для диффузионных транзисторов предельная частота коллекторной цепи как функция интегрального потока (при подстановке в формулу (2) выражения (6)), будет иметь вид:

$$D'(\Phi) = D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}}; \\ f''_k(\Phi) = \frac{1}{2\pi r'_6 S_k} \left[ \frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 g(x'_2 - x'_1)}{12(\varphi_k - u_k) 4D'(\Phi)} \right]^{-1/3} \quad (11)$$

Граничная частота коэффициента передачи по току для диффузионных транзисторов как функция интегрального потока описывается формулой

$$f'_\alpha = \frac{g I_3}{2\pi k T C_{д.э.}(\Phi)} \quad (12)$$

Диффузионная емкость эмиттера связана с накоплением носителей заряда в области базы и определяется по формуле

$$C_{д.э.} = \frac{g I_3 w^2}{2k T D_p} \quad (13)$$

При воздействии облучения диффузионная

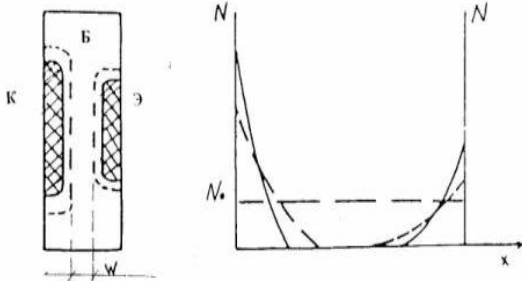


Рис. 1. Структура и распределения примесей в диффузионных транзисторах ( $N_0$  – концентрация примеси в выращенном кристалле,  $N_1$  – концентрация продифундировавших примесей,  $N_2$  – концентрация после облучения)

емкость эмиттера, как функция интегрального потока с учетом

$$D_1 = D_0 [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-E_m/(kT)} \quad (14)$$

и изменившейся ширины базы на величину сдвига **p-n** переходов (13):

$$C_{д.э.}(\Phi) = g I_3 \frac{w^2 - 2(\Delta x'_{p-n})^2}{2k T D_p} \quad (15)$$

где  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок в **p** – области.

Изменение положения **p-n** перехода под воздействием нейтронов определяется как разность между глубинами залегания в условиях облучения и в нормальных условиях работы

$$\Delta x'_{p-n} = x'_{p-n} - x_{p-n}. \quad (16)$$

Подставив выражение (16) в формулу для определения граничной частоты коэффициента передачи по току (12) и выполнив соответствующие преобразования, получим:

$$\Delta x'_{p-n} = 2 \sqrt{D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}} \cdot \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}}}} - 2 \sqrt{Dt \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi Dt}}}}; \quad (17)$$

$$f'_{\alpha}(\Phi) = \frac{D_p}{\pi \left\{ w^2 - 8 \left[ \sqrt{D'(\Phi)} \left( \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D'(\Phi)}} \right)^{\frac{1}{2}} - \sqrt{Dt} \left( \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D(\Phi)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right\}}.$$

Зная изменение граничной частоты по току  $f'_{\alpha}(F)$  как функции потока частиц и значение емкости коллекторного перехода в условиях облучения (6), и проведя преобразования, можно записать выражение для определения максимальной частоты генерации транзистора (изготовленного с применением диффузионной технологии) при облучении ускоренными частицами

$$f'_{\max}(\Phi) = \left( \frac{\alpha_0 D_p}{30 r'_6 \pi S_k} \left\{ w^2 - 8 \left[ \sqrt{D'(\Phi)} \left( \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D'(\Phi)}} \right)^{\frac{1}{2}} - \sqrt{Dt} \left( \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D(\Phi)}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2 \right\} \cdot \left[ \frac{(\epsilon \epsilon_0)^2 g(x_2 - x_1)}{12(\varphi_k - u_k) 4D'(\Phi)} \right]^{-1/3} \right)^{1/2}. \quad (18)$$

**Сплавные транзисторы.** Схемы образования p-n переходов при сплавлении и распределении примеси показаны на рис. 2.

Для сплавных транзисторов граничные частоты коэффициентов передачи по току и максимальную частоту генерации, в условиях облучения можно определить с учетом зависимостей  $C_3$  и  $f_3$ . При подстановке выражения (8) в формулу (1), получаем значение предельной частоты эмиттерной цепи как функции интегрального потока

$$f_3''(\Phi) = \frac{1}{2\pi r_3 S_3} \left[ \frac{\varepsilon \varepsilon_0 g N_{0,3} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D'(\Phi)}}}{2(\varphi_k - u_3)} \right]^{-1/2} \quad (19)$$

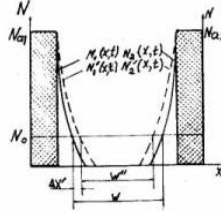
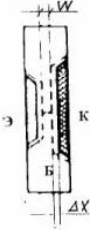


Рис. 2. Расчетные распределения примесей в сплавной транзисторной структуре до  $N(x,t)$  и после  $N''(x,t)$  облучения

Выражения для граничной частоты коэффициента передачи по току  $f_\alpha''$  для сплавных транзисторов при облучении с учетом выражения (15) и для изменения расстояния  $p-n$  перехода от поверхности под действием высокоэнергетического облучения:

$$\Delta x''_{p-n} = 2\sqrt{D_0 t [N_v + N'_v(\Phi)] e^{-\frac{E_m}{kT}} \cdot \ln \frac{N_0}{N_i} - 2\sqrt{D \cdot t \cdot \ln \frac{N_0}{N_i}}}; \quad (20)$$

$$f_\alpha''(\Phi) = \frac{D_p}{\pi \left[ w^2 - 8 \left( \sqrt{D'(\Phi)} \sqrt{\ln \frac{N_0}{N_i}} - \sqrt{Dt} \cdot \sqrt{\ln \frac{N_0}{N_i}} \right)^2 \right]}. \quad (21)$$

Максимальная частота генерации сплавных транзисторов при высокоэнергетическом облучении запишется как

$$f_{\max}'' = \left\{ \frac{\alpha_0 D_p}{30r_6' \pi S_k} \left[ w^2 - 8 \left( \left[ \sqrt{D'(\Phi)} \ln \frac{N_0}{N_i} - \sqrt{Dt} \ln \frac{N_0}{N_i} \right]^2 \right)^{-1} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ \left( (\varepsilon \varepsilon_0)^2 g N_{0,k} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D'(\Phi)}} \right) / (2(\varphi_k - u_k)) \right]^{-1/3} \right\}^{1/2}. \quad (22)$$

**Диффузионные планарные транзисторные структуры интегральных схем и диффузионно сплавные транзисторы.** Исходя из ранее приведенных зависимостей емкости коллекторного и эмиттерного переходов (для диффузионных и сплавных транзисторов (5, 9)), можно записать граничные частоты для диффузионно - сплавных транзисторов [4] как функцию интегрального потока высокоэнергетических частиц (рис. 3).

Предельная частота эмиттерной цепи как функция интегрального

потока частиц с учетом зависимости (8) будет определяться выражением (19), так как эмиттерный переход диффузионно - сплавного транзистора образован при сплавлении

$$f_3''(\Phi) = \frac{1}{2\pi r_3 S_3} \left[ \frac{\varepsilon \varepsilon_0 g N_0 \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D'(\Phi)}}}{2(\varphi_k - u_3)} \right]^{-1/2}. \quad (23)$$

Так как коллекторный переход диффузионно-сплавных транзисторов получен в результате диффузии, то предельная частота коллекторной цепи как функция интегрального потока с учетом (6) будет определяться согласно

$$f_k(\Phi) = \frac{1}{2\pi r_6' S_k} \left[ \frac{(\varepsilon \varepsilon_0)^2 g(x_2 - x_1)}{12(\varphi_k - u_k) 4D'(\Phi)} \right]^{1/3}. \quad (24)$$

Граничная частота коэффициента передачи по току  $f_\alpha$  в этом случае запишется как

$$f_\alpha = \frac{g I_3}{2\pi k T C_{д.з.}(\Phi)}. \quad (25)$$

Диффузионная емкость эмиттера при облучении для диффузионно-сплавного транзистора, как функция интегрального потока высокоэнергетических частиц с учетом (14) и изменившейся ширины базы на сумму сдвигов  $p-n$  переходов, будет равна

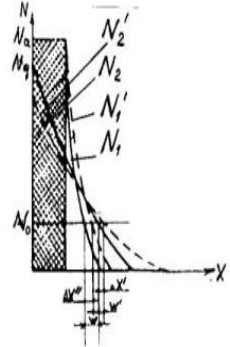
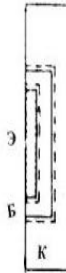


Рис. 3. Расчетные распределения примесей в диффузионно-сплавной и диффузионной транзисторной структуре интегральных схем до  $N(x)$  и после  $N''(x)$  облучения

$$C_{д.з.}'(\Phi) = \frac{g I_3 \left[ w^2 - (\Delta x'_{p-n} + \Delta x''_{p-n})^2 \right]}{2\kappa T D_p}. \quad (26)$$

Подставляя (26) с учетом (8) в выражение (25) и, проводя соответствующие преобразования, получим

$$f_\alpha(\Phi) = \frac{D_p}{\pi} \left\{ w^2 - 4 \left[ \sqrt{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D'(\Phi)}}} - \right. \right.$$

$$- \sqrt{\frac{Dt \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi Dt}}}{}} + \sqrt{\frac{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i}}{}} - \sqrt{\frac{Dt \ln \frac{N_0}{N_i}}{}} \Bigg\}^{-1} \quad (27)$$

Максимальная частота генерации в условиях облучения для планарных и диффузионно-сплавных транзисторов с учетом емкости коллекторного перехода при облучении (6) и (27) будет

$$f_{\max}(\Phi) = \sqrt{\frac{\alpha_0 f_{\alpha}(\Phi)}{30 r_0' C}} = \left\{ \frac{\alpha_0 D_p}{30 \pi r_0' S_k'} \left\{ w^2 - 4 \left[ \sqrt{\frac{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D'(\Phi)}}{}}}{}} - \right. \right. \quad (28)$$

$$\left. \left. - \sqrt{\frac{Dt \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D \cdot t}}}{}} + \sqrt{\frac{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i}}{}} - \sqrt{\frac{Dt \ln \frac{N_0}{N_i}}{}} \right]^2 \right\}^{-1} \times$$

$$\times \left[ \frac{(\epsilon \epsilon_0)^2 g(x_2 - x_1)}{12(\varphi_k - u_k) 4 D'(\Phi)} \right]^{-\frac{1}{3}} \Bigg\}^{\frac{1}{2}}$$

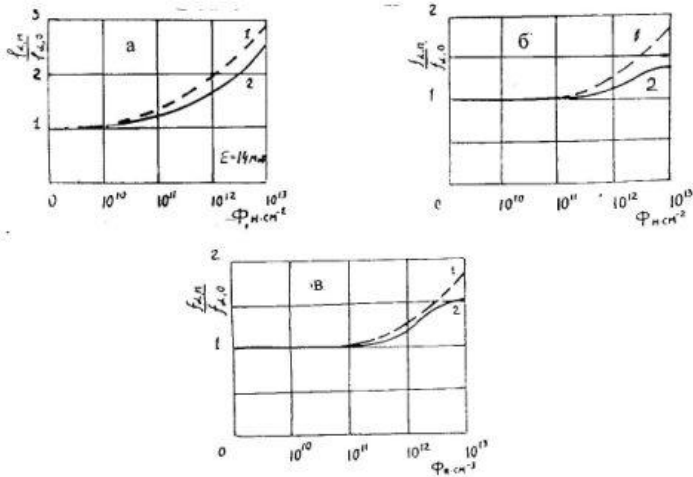


Рис. 4. Изменение предельной частоты транзисторных структур, изготовленных по различной технологии (1 – расчет с помощью ЭВМ, 2 – экспериментальные зависимости при облучении нейтронами с энергией 14 Мэв)

**Выводы.** Полученные выше формулы показывают, что существуют зависимости предельных частот транзисторов от интегрального по-



тока частиц высокоэнергетического облучения, и эти зависимости определяются исходным распределением примеси в структурах транзисторов. Исходное распределение примеси определяется технологией изготовления транзисторных структур. Необходимо учитывать также концентрацию электрически активных центров, созданных в процессе бомбардировки.

Результаты расчета на ЭВМ зависимости предельных частот от интегрального потока облучения и технологии изготовления показаны на рис. 4. Там же приведены результаты экспериментальных исследований и их сравнение с зависимостями, которые получены при расчете на ЭВМ.

Следует отметить, что максимальной устойчивостью обладают те структуры, которые характеризуются таким изменением положения **p-n** переходов и их ширины, когда с одной стороны базовая область сохраняет свои геометрические размеры, а наклон кривых распределения электрически активных центров в областях **p-n** переходов изменяется незначительно. Это является определяющим для повышенной радиационной стойкости транзисторных структур ИС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дунаев С.Д., Шевелев М.И. Влияние радиации на параметры транзисторов // Сб. ст. Воронежского политехнического института. – Воронеж : ВПИ. – 1999. – С. 151.
2. Дьячкин В.П. Радиационное изменение частотных свойств транзисторов // Приборостроение. – К.: Техника. – 1986. – № 5. – С. 51.
3. Гнап А.К., Коваленко Н.Й., Клименко К.С. Изменение параметров **p-n** перехода при радиоактивном облучении // Інформаційно - керуючі системи на залізничному транспорті. – 1997. – №3. – С. 42 - 45.
4. Спиридонов Н.С. Основные теории транзисторов. – К.: Техніка, – 1969. – 27 с.

Поступила 26.03.2002

**ГНАП Арлен Карлович**, доктор физ. – мат. наук, профессор, профессор кафедры высшей математики и физики Харьковского национального аграрного университета. Окончил ХГУ в 1965 году. Область научных интересов – радиофизика и электроника.

**КОВАЛЕНКО Николай Иосифович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и физики Харьковского национального аграрного университета. Окончил ХГУ в 1971 году. Область научных интересов – радиофизика и электроника.

**ХРАМОВ Евгений Филиппович**, аспирант Украинской Национальной академии связи (г. Одесса). Область научных интересов – радиофизика и электроника.

**ПРОХОРОВ Григорий Валерьевич**, аспирант Украинской Национальной академии связи (г. Одесса). Область научных интересов – радиофизика и электроника.