

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_α и f_β определяются как частоты, для которых α или β , соответственно, снижаются в корень из двух раз относительно своих значений на низкой частоте.

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

Одной из основных характеристик для оценки частотных свойств транзисторов является частота коэффициента передачи тока f_α в схеме с

общей базой, которая определяется по частотной зависимости α . Зависимость для α 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_α порядка единиц мегагерц определяется практически только временем пролета носителей. Для транзисторов с граничными частотами f_α порядка 100 мГц частотная зависимость коэффициента усиления по току α 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_{α} 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; Φ – 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

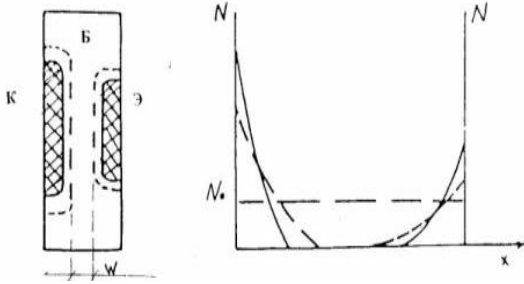


Рис. 1. Структура и распределения примесей в диффузионных транзисторах (N_0 – концентрация примеси в выращенном кристалле, N_1 – концентрация продифундировавших примесей, N_2 – концентрация после облучения)

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

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

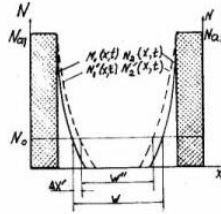
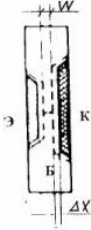


Рис. 2. Расчетные распределения примесей в сплавной транзисторной структуре до $N(x,t)$ и после $N''(x,t)$ облучения

Выражения для граничной частоты коэффициента передачи по току f_α'' 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

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

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_α 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

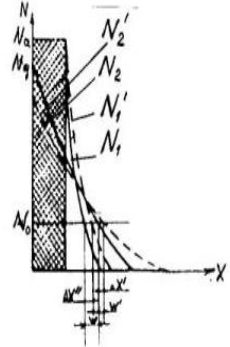
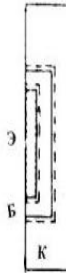


Рис. 3. Расчетные распределения примесей в диффузионно-сплавной и диффузионной транзисторной структуре интегральных схем до $N(x)$ и после $N''(x)$ облучения

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

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

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

$$- \sqrt{\frac{D t \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D t}}}{N_i \sqrt{\pi D t}}} + \sqrt{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i}} - \sqrt{D t \ln \frac{N_0}{N_i}} \Bigg\}^{-1} \quad (27)$$

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

$$f_{\max}(\Phi) = \sqrt{\frac{\alpha_0 f_{\alpha}(\Phi)}{30 r_0' C}} = \left\{ \frac{\alpha_0 D_p}{30 \pi r_0' S_k'} \left\{ w^2 - 4 \left[\sqrt{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D'(\Phi)}}} - \sqrt{D t \ln \frac{N_0}{N_i \sqrt{\pi D t}}} + \sqrt{D'(\Phi) \ln \frac{N_0}{N_i}} - \sqrt{D t \ln \frac{N_0}{N_i}} \right]^2 \right\}^{-1} \right. \quad (28)$$

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

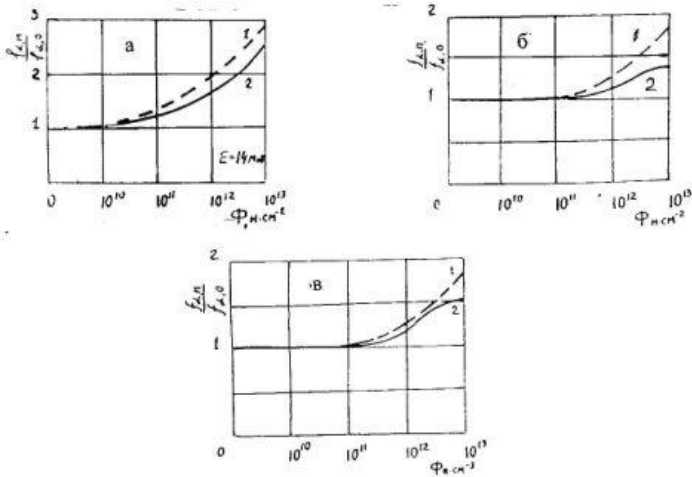


Рис. 4. Изменение предельной частоты транзисторных структур, изготовленных по различной технологии (1 – расчет с помощью ЭВМ, 2 – экспериментальные зависимости при облучении нейтронами с энергией 14 Мэв)

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.