

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМБИНИРОВАННОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ

Запорожская государственная инженерная академия

В 1953 г. была обнаружена сквозная проводимость n-p-n транзисторов в парах воды и предположено, что положительный заряд адсорбированных водяных молекул, вызывая инверсию р-базы, создает канал, по которому электроны из эмиттера текут непосредственно в коллектор. В ряде работ канал создавали поперечным внешним полем, прикладываемым к р-n переходам через слюду или оксид [1].

Изучение физических особенностей каналов позволило установить, что они способствуют увеличению обратного тока переходов и могут влиять на прямую ветвь вольт-амперной характеристики. При этом сплошные доходящие до контактов каналы способствуют значительному изменению коэффициента усиления биполярных транзисторов [2].

Известны также исследования по влиянию искусственно создаваемых каналов на работу IGBT-транзисторов [3,4] для определения условий "защелкивания" таких структур. В то же время наличие каналов оказывает не только отрицательное влияние на функционирование микроэлектронных структур. В случае, когда условия их возникновения и распространения связаны с изменением внешних физических величин каналные приборы используются в качестве сенсоров [5].

Это позволило предложить конструкцию прибора нового типа [6] и провести исследование его характеристик на основе математического моделирования.

В общем случае конструкцию комбинированной транзисторной структуры можно представить в виде транзистора-прототипа, на поверхности которого создана МДП-структура [4...7]. Схема замещения рассматриваемого прибора имеет вид биполярного транзистора, шунтируемого МДП-транзистором [7].

Особенности конструкции прибора заключаются в следующем:

- база является одновременно и подложкой МДП-структуры;
- источники тока J_k и J_3 соединены последовательно, а параллельно ним подключен источник тока J_1 ;
- сопротивление базы R_6 через емкости C_1 и C_2 подключено одновременно как к источникам тока J_k и J_3 , так и к затвору;
- сопротивление коллектора R_k соединено с источниками тока J_3 и J_k , а при помощи емкости C_3 - с сопротивлением R_6 ;
- емкость C_4 подключена параллельно источнику тока J_3 .

Источник тока J_k моделирует ток коллектора комбинированной транзисторной системы [8]:

$$I_k = I_{k1} + I_{k2} + I_{k3} + I_{k4} \quad (1)$$

где

$$I_{k1} = [I_{тк} / (1 + \beta_{и})] [\exp (U_{Jk} / U_{тк}) - 1] \quad (2)$$

$$I_{k2} = (dU_{Jk} / dt) \{ C_{ок} + (\tau_k I_{тк} / [1 + \beta_{и}]^2 U_{тк}) \exp (U_{Jk} / U_{тк}) \} \quad (3)$$

$$I_{k3} = -\beta / (1 + \beta)^2 [I_{T3} (U_{J3}) - 1] \quad (4)$$

$$I_{k4} = U_{Jk} / R_{yk} \quad (5)$$

В выражениях (1-5): I_k - полный ток коллектора; I_{k1} - ток, соответствующий прямому активному режиму биполярного транзистора; I_{k2} - переменная составляющая тока коллектора; I_{k3} - ток в инверсном активном режиме; I_{k4} - ток утечек; $\beta_{и}, \beta$ - соответственно инверсный и нормальный коэффициенты усиления тока в схеме с общим эмиттером; τ_k - постоянная времени диффузионной емкости коллектора; $I_{Тк}, I_{Тэ}$ - соответственно тепловые токи коллекторного и эмиттерного переходов, используемые при расчете; $U_{Тк}, U_{Тэ}$ - соответственно температурные потенциалы коллекторного и эмиттерного переходов; $U_{Jт}, U_{Jэ}$ - соответственно напряжения на коллекторном и эмиттерном переходах; $C_{ок}$ - барьерная емкость коллекторного перехода; R_{yk} - сопротивление утечек.

В случае, когда $dU_{Jk} / dt = 0$ и $R_{yk} \rightarrow \infty$, $I_{k2} = I_{k4} = 0$ и уравнение (1) имеет вид классической модели Эберса-Молла.

Источник тока $J_э$ моделирует ток эмиттера комбинированной транзисторной системы и определяется аналогичным образом.

$$I_э = I_{э1} + I_{э2} + I_{э3} + I_{э4} \quad (6)$$

$$I_{э1} = [I_{Тэ} / (1 + \beta)] [\exp (U_{Jэ} / U_{Тэ}) - 1] \quad (7)$$

$$I_{э2} = (dU_{Jэ} / dt) \{ C_{оэ} + (\tau_э I_{Тэ} / [1 + \beta])^2 U_{Тэ} \exp (U_{Jэ} / U_{Тэ}) \} \quad (8)$$

$$I_{э3} = -\beta_{и} / (1 + \beta_{и})^2 [I_{Тэ} (U_{Jэ}) - 1] \quad (9)$$

$$I_{э4} = U_{Jэ} / R_{yэ} \quad (10)$$

В выражениях (6-10) : $I_э$ - полный ток эмиттера; $I_{э1}$ - ток, соответствующий прямому активному режиму биполярного транзистора; $I_{э2}$ - переменная составляющая тока коллектора; $I_{э3}$ - ток в инверсном активном режиме; $I_{э4}$ - ток утечек; $\tau_э$ - постоянная времени диффузионной емкости коллектора; $C_{оэ}$ - барьерная емкость коллекторного перехода; $R_{yэ}$ - сопротивление утечек.

Также как и для выражений (1)..(5) при $dU_{Jэ} / dt = 0$ и $R_{yэ} \rightarrow \infty$, в рассматриваемом случае имеем $I_{э2} = I_{э4} = 0$.

Для тока источника J_1 , характеризующего МДП-часть прибора можно записать :

а) при $|U_{J1}| \leq f / (1 + \eta)$;

$$I_1 = Be U_{J1} \{ f - 0,5 (1 + \eta) |U_{J1}| \} + g_e U_{J1}, \quad (11)$$

б) при $|U_{J1}| > f / (1 + \eta)$;

$$I_1 = 0,5 [Be / (1 + \eta)] f^2 \text{sign } U_{J1} + g_e U_{J1}, \quad (12)$$

в) при $|U_{c1}| \leq U_{пор} - 2 \eta U_{c4} / 3$

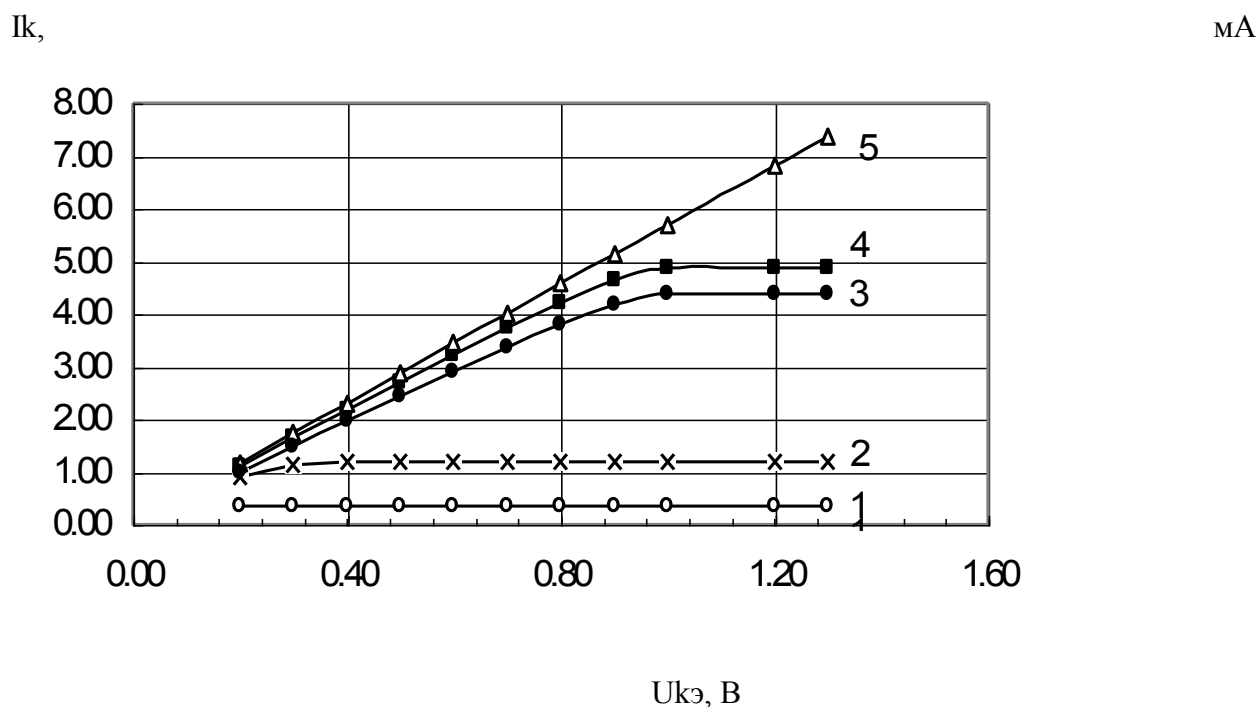
$$I_1 = 0 \quad (13)$$

где $f = U_{c1} - U_{пор} + (2/3) \eta U_{c4}$; $U_{пор}$ - пороговое напряжение МДП-структуры; η - поправочный коэффициент; g - внутренняя проводимость МДП-структуры; U_{c1}, U_{J1}, U_{c4} -

соответственно напряжение затвор-исток (эмиттер), сток-исток (коллектор-эмиттер), подложка-исток (база-эмиттер).

Моделирование комбинированной транзисторной структуры проводили на разработанной выше эквивалентной схеме при помощи программы МАЭС-II [8], модернизированной и дополненной в соответствии с решаемой задачей.

Семейство обобщенных выходных характеристик $I_k(U_{кэ})$ представлено на рисунке.



Выходные характеристики комбинированной транзисторной структуры:
1 - $U_3 = 0$ В; 2 - $U_3 = 2.2$ В; 3 - $U_3 = 2.4$ В (данные работы [3]);
4 - $U_3 = 2.4$ В; 5 - $U_3 = 2.6$ В.

При $U_3 < U_{пор}$ вид приведенных характеристик совпадает с видом характеристик малоомощного планарного биполярного транзистора аналоговых интегральных схем. При $U_3 > U_{пор}$ характеристики прибора сходны с характеристиками биполярного транзистора, шунтируемого активным сопротивлением [9]. Но в рассматриваемом случае возникает ряд эффектов, определяющих нелинейность выходных характеристик. Ток подложки (базы), который протекает параллельно току канала, вызывает перераспределение потенциала подложки [3], что изменяет не только пороговое напряжение МОП-структуры, но и величину тока коллектора (стока). Как следствие, выходные характеристики переходят в режим насыщения и величина тока, протекающего в выходной цепи, при больших значениях напряжения $U_{кэ}$ больше его величины для классического биполярного транзистора. Фактически, величина этого тока определяется конструктивно-технологическими параметрами МОП- структуры.

Для сравнения на рисунке также приведены результаты расчетов фрагментов TIGBT-транзисторов, аналогичных рассматриваемым в данной работе. Сопоставление результатов расчетов по предложенной модели с результатами, приведенными в работе [3] обнаруживает их хорошее совпадение [особенно на начальных участках характеристики $I_k(U_{кэ})$].

Как видно из полученных данных, выходной ток комбинированной транзисторной структуры зависит от тока базы (подложки), напряжения коллектор-эмиттер и потенциала затвора. Используя в качестве материала затвора каталитически активный палладий, а d в качестве материала подзатворного диэлектрика - SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , получим водородочувствительный сенсор, аналогичный описанному в работе [5]. Однако, в отличие

от него, предлагаемый тип сенсора обладает возможностью адаптивной регулировки, что значительно расширяет диапазон регистрируемой величины концентрации водорода. На основе исследуемого прибора путем варьирования вида материала затвора и подзатворного диэлектрика, возможно создание не только вышеназванного водородчувствительного сенсора, но и сенсоров других как электрических, так и неэлектрических величин, которые имеют возможность независимой перестройки режимов работы [10].

РЕЗЮМЕ

Проведено моделирование характеристик комбинированной транзисторной структуры на основе эквивалентной схемы, разработанной исходя из физических основ функционирования и конструкции прибора. На основе предлагаемой микроэлектронной структуры авторами продолжаются работы по созданию водородчувствительного сенсора, так и сенсоров других физических величин, обладающих возможностью адаптивной настройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинов Р.О. Влияние поверхности на характеристики полупроводниковых приборов. Киев, Наукова думка, 1972. - 115 с.
2. Зуев В.А., Саченко А.В., Толпыго К.Б. Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах. - М.: Сов. радио, 1977.-256 с.
3. Solid state electronics- 1994. - Vol. 33, No 3. - Pp. 507-514.
4. IEEE Trans. Electrjn. Devices.-1992. - Vol. 39. - No 5. - Pp. 1170-1178.
5. IEEE Trans. Electrjn. Devices.-1992. - Vol. 39. - No 4. - Pp. 813-818.
6. А.с. 1091783 СССР. Биполярный транзистор / В.Л.Костенко, О.Д.Баранцева // Изобретения в СССР и за рубежом. - 1984. - № 1.
7. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. - М.: Мир, 1989. - 630 с.
6. Водопьянова Г.В., Дымова С.А., Кланова Т.С. и др. Программа моделирования аналоговых электронных схем МАЭС-П / Руководство пользователя. - Т6.304.009-0193-2.-1993. - Ч.2.
9. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / Под ред. И.Г.Бергельсона - М.: Сов. радио, 1968 - 503с.
- 10..Kiselyov E.N.,Kostenko V.L. The magnetic and dielectric properties microwave measuring method / XXVth General Assembly International Union of Radio Science. -Lille. -1996. - P.20.