

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК В СВЧ УСТРОЙСТВАХ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

Э.М.АЛЕСКЕРОВ, А.А.МАМЕДОВ

*Азербайджанский Технический Университет*

*AZ 1073, Баку, пр. Г.Джавида 25*

Рассмотрены вопросы расчета выходных характеристик полевого транзистора с затвором Шоттки для применения в СВЧ-устройствах. Предложена методика определения основных параметров с учетом нелинейных эффектов.

При анализе нелинейных устройств СВЧ основным вопросом является достоверное описание тех свойств контактов металл-полупроводник (КМП), которые определяются их вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Рассмотрим вопрос о соответствии теоретических и экспериментальных характеристик с целью целесообразности выбора того или иного критерия для оценки нелинейных и преобразовательных свойств КМП.

В настоящее время имеется значительное число работ как теоретического, так и экспериментального характера, в которых определены параметры ВАХ для различного рода контактов на основе различных полупроводников при нормальных условиях и в диапазоне температур при воздействии перепада давлений и ионизирующих радиаций с использованием большого числа металлов [1-4].

Как известно, ВАХ КМП с барьером Шоттки (БШ) определяется соотношением [1]

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU_0}{akT}} - 1 \right). \quad (1)$$

В случае контакта с вырожденными полупроводниками строгие расчеты ВАХ получаются более сложными. При отсутствии переменных напряжений хорошее соответствие с опытом дает полуэмпирическое соотношение [5]:

$$I = aU_0 e^{-U_0/U_1} + I_0 \left( e^{\frac{qU_0}{akT}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $U_1$  - напряжение максимума перехода ВАХ,  $a$  - коэффициент, имеющий размерность обратную сопротивлению.

Однако, в теоретически полученных соотношениях не удастся учесть большого количества технологических и физических факторов, существенно влияющих на ВАХ и приводящих к отклонению реальных ВАХ от теоретических.

Величина  $\alpha$ , входящая в (1), для различных контактов может находиться в пределах от 0,9 до 16,7 и определяется исходя из экспериментально снятых ВАХ [3]. Для идеального КМП-перехода  $\alpha=1$ . В случае значительного туннельного тока, определяемого структурой области раздела,  $\alpha$  опускается до величины 0,9. При существенном влиянии генерационно-рекомбинационной составляющей тока, значение  $\alpha$  достигает величины 2,1. С ростом инжекционного тока  $\alpha$  стремится к 8,3, а при увеличении падения напряжения на объемном сопротивлении полупроводника может достигать величины 16,7.

Значительную погрешность вносит пренебрежение поверхностными состояниями, зависящими от приложенного напряжения. Изменение поверхностных состояний не всегда успевает вслед за изменениями внешних

напряжений, приложенных к контактам, и это ограничивает предельную частоту работы БШ [6].

Известно, что прямосмещенные р-п-переходы обладают диффузионной емкостью, обусловленной инжекцией неосновных носителей в нейтральные области [7]. Эта емкость экспоненциально растет с ростом прямого смещения и превосходит емкость области пространственного заряда уже при небольших смещениях. При изменении полярности приложенного смещения время рассасывания неосновных носителей в базе вносит существенный вклад в задержку переключения.

Процессы в КМП с БШ существенно отличаются от этого случая. Инжектированные из полупроводника в металл электроны являются в нем основными и быстро приходят в равновесное состояние ( $\sim 10^{-12}$ с). Поэтому после смены полярности напряжения на противоположную не теряется время на рассасывание инжектированного заряда, как в случае с р-п-переходом, вследствие чего КМП являются гораздо более быстродействующими приборами, чем биполярные.

На необходимость использования экспериментально снятых ВАХ для оценки нелинейных свойств контакта при преобразовании частоты было указано еще в [6]. Однако в этой работе авторы оперировали крутизной ВАХ, не учитывая при этом нелинейной вольт-фарадной характеристики контакта, влияние которой при работе в СВЧ диапазоне заметно возрастает.

Важный вопрос, который необходимо рассмотреть, прежде чем определить метод анализа нелинейных устройств СВЧ, заключается в выборе тех исходных величин, которыми необходимо задаться как внешним гармоническим воздействием для рассмотрения последующего влияния их на работу устройства. Возможны два варианта такого выбора: заданное напряжение или заданный ток.

Как известно, в вакуумных СВЧ приборах приложенные напряжения определяют изменение координат электронов, т.е. используется метод заданного напряжения. При очень малых длинах канала в СВЧ твердотельных приборах, в частности, в полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ), когда область пространственного заряда распространяется на весь канал, носители преодолевают эту область баллистическим переносом, когда не происходит рассеяния носителей, т.е. имеется полная аналогия с вакуумными приборами. Поэтому мы, также как в [8], используем метод заданного на контакте гармонического напряжения. Применительно к задачам преобразования частоты содержание этого метода заключается в использовании итерационных процедур.

Исходя из особенностей рассматриваемой схемы преобразования частоты, выбирается ряд частот, амплитуды колебаний напряжения которых на контакте должны быть по условиям работы схемы наибольшими и которые, таким образом, оказывают наибольшее влияние на исследуемые процессы преобразования частоты. Вначале амплитуды и фазы напряжений этих частот полагаются заданными и из анализа работы контакта отыскиваются амплитуды и фазы токов всех тех частот, которые включены в рассмотрение. При этом амплитуды токов обычно оказываются зависящими по нелинейному закону от амплитуд воздействующих напряжений. Затем схема анализируется по каждой из рассматриваемых частот, причем контакт заменяется соответствующей квазилинейной (т.е. зависящей от амплитуд воздействующих напряжений) проводимостью, и из полученной таким способом системы соответствующего числа обычных нелинейных уравнений определяются те амплитуды и фазы напряжений на контакте, которые в начале анализа полагались заданными. Такой метод сведения задачи определения стационарных вариантов решения нелинейных дифференциальных уравнений к решению системы нелинейных алгебраических

уравнений обычно приводит к сравнительно несложным результатам, когда амплитуды ряда воздействующих напряжений можно считать небольшими и пренебречь членами, содержащими высокие степени этих амплитуд.

Если амплитуды достаточно большие, то можно согласно методике, описанной в [9], аппроксимировать нелинейные характеристики контакта полиномами и затем поступить так же, как и в предыдущем случае.

Исходя из вышеизложенного, проанализируем работу СВЧ усилителя мощности на ПТШ с учетом нелинейных эффектов. Применяемые в СВЧ-технике ПТШ формируются на проводящей эпитаксиальной пленке GaAs, лежащей на высокоомной полуизолирующей подложке из того же материала, и содержащей помимо затвора два невыпрямляющих металлических контакта сток-исток.

Эквивалентная схема ПТШ имеет вид, показанный на Рис.1, где  $R_u$  и  $R_c$  - сопротивления активных потерь на истоке и стоке,  $G+j\omega C_{зи}$  и  $G+j\omega C_{зс}$  - проводимости обратносмещенного барьера Шоттки между затвором и, соответственно, истоком и стоком на круговой частоте  $\omega$ ,  $R_{uc}$  сопротивление канала в отсутствие питающих напряжений,  $C_{uc}$  - междуэлектродная емкость исток-сток [1]. Источник тока  $I_c$  в схеме будет иметь разную величину в зависимости от характера сигнала, действующего между затвором и истоком.

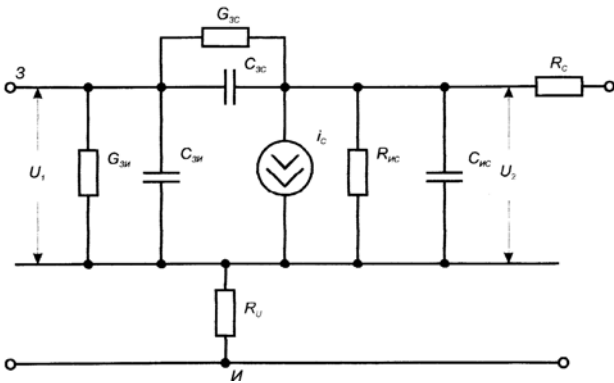


Рис.1.

Полная эквивалентная схема полевого транзистора с барьером Шоттки.

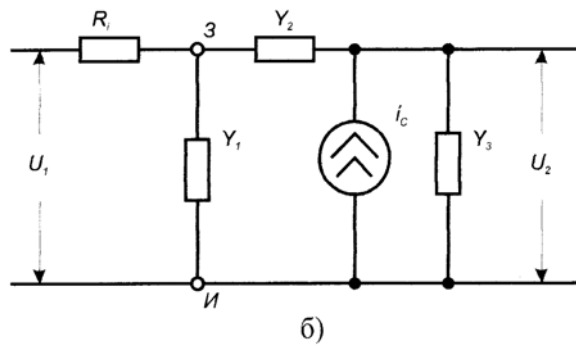


Рис.2.

Эквивалентная схема полевого транзистора с барьером Шоттки при  $R_u=R_c=0$ .

В линейном режиме или на постоянном токе  $I_c=SU_{зи}$ , где  $S$  - крутизна проходной характеристики в рабочей точке. Проблема заключается в том, что в случае большого входного сигнала  $S$  становится зависящей от величины этого сигнала. При многочастотном воздействии эта зависимость распространяется на все амплитуды воздействующих сигналов, причем амплитуды тока  $I_c$  на разных частотах, строго говоря, должны зависеть также и от амплитуд выходных напряжений  $U_{uc}$ , действующих между стоком и истоком [8].

Следуя [10], можно в схеме (Рис.1) положить, что приближенно  $R_u=R_c=0$ , тогда схема примет вид, показанный на Рис.2, где  $Y_3=Y_n+1/R_{uc}+j\omega C_{uc}$ ,  $Y_n$  - проводимость нагрузки.

Считая, что комплексный переменный ток  $i_c=SU_1$ , где  $S$  - комплексная крутизна ПТШ, а  $U_1$  - комплексное переменное напряжение затвор-исток, можно из анализа схемы (Рис.2) получить следующие соотношения:

$$U_2/U_1 = (1 - S/Y_2)/R_i(Y_\Sigma - S), \quad (3)$$

$$Y_\Sigma = Y_3(1 + Y_3/Y_2)(Y_1 + 1/R_i), \quad (4)$$

первое из которых определяет комплексный коэффициент усиления усилителя на ПТШ по напряжению. Зная зависимость  $S$  от  $U_1$  и задаваясь значением  $U_1$ , можно определить соответствующее ему значение  $U_2$  в слабо нелинейном режиме.

В случае сильно нелинейного режима указанный алгоритм расчета выходного напряжения СВЧ-усилителя на ПТШ надо использовать в итерационной процедуре расчета. Эта процедура состоит в первоначальном определении  $U_2$  в приближении, когда  $S$  не зависит от  $U_2$ , и в последующей серии аналогичных расчетов, в которых по найденному в первом приближении значению  $U_2$  уточняется величина  $S$ , вновь определяется зависимость  $U_2=f(U_{i1})$  и из выражения (3) при известном  $U_2$  последовательные значения  $U_{i1}$  и  $S$  и т.д. до совпадения полученных в каком-то предыдущем и последующем расчетах значения  $U_2$  с заданной степенью погрешности.

Комплексный характер крутизны  $S$  в общем случае определяется тем, что из-за пролетных эффектов в пространстве исток-сток ток стока  $I_c$  запаздывает относительно напряжения  $U_1$  на фазовый угол  $\theta$ , который равен  $\omega L/v$ , где  $L$  - длина канала, а  $v$  - средняя скорость дрейфа носителей в канале.

Описанный алгоритм позволяет определить выходные параметры СВЧ усилителя на ПТШ с учетом нелинейности характеристик.

1. В.И.Стриха, Е.В.Бузанева, И.А.Родзиевский, *Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки*. М., Сов. Радио, (1974) 248.
2. В.И.Стриха, Е.В.Бузанева, *Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике*. М., Радио и связь, (1987) 256.
3. Э.Х.Родерик, *Контакты металл-полупроводник*, Пер. с англ. под ред. Г.В.Степанова. М., Радио и связь, (1982) 208.
4. К.А.Валиев, Ю.И.Пашинцев, Г.В.Петров, *Применение контакта металл-полупроводник в электронике*. М., Радио и связь, (1981) 304.
5. *СВЧ полупроводниковые приборы и их применение*, Под ред. Г.Уотсона, пер. с англ. В.С.Эткина. М., Мир, (1972) 660.
6. И.А.Радзиевский, В.И.Стриха, *Полупроводниковая техника и микроэлектроника (Киев)*, вып.8 (1972) 73.
7. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, *Некоторые вопросы физики электронно-дырочных переходов*, Баку, Элм, (1971) 245.
8. В.А.Малышев, Г.Г.Червяков, Д.Д.Ганзий, *Нелинейные микроволновые полупроводниковые устройства*, Таганрог, ТРТУ, (2001) 354.
9. В.А.Малышев, *Радиотехника и электроника*, **10** (1965) 1635.
10. В.К.Копаненко, В.А.Романюк, *Известия вузов. Радиоэлектроника*, **28** №7 (1985) 38.

#### GEYRİ XƏTTİ EFFEKTLƏR NƏZƏRƏ ALINMAQLA İFRATYÜKSƏK TEZLİK QURĞULARINDA METAL-YARIMKEÇİRİCİ KONTAKTLARININ XARAKTERİSTİKALARI

E.M.ƏLƏSGƏROV, Ə.A.MƏMMƏDOV

İfrat yüksək tezlik qurğularında tədbiq olunmaq üçün Şottki zatvorlu sahə tranzistorunun çıxış xarakteristikalarının hesablanması məsələlərinə baxılmışdır. Xarakteristikaların geyri-xəttiliyi nəzərə alınmaqla əsas parametrlərin təyini metodikası təklif edilmişdir.

#### CHARACTERISTICS OF METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS IN SUPERHIGH FREQUENCY DEVICES WITH CONSIDERATION OF NONLINEAR EFFECTS

E.M.ALESKEROV, A.A.MAMEDOV

The problems design characteristics of Shottky field-effect transistors in superhigh frequency devices was considered.

The methods of determination the main parameters SFET with consideration of nonlinear effects was suggested.

Редактор: С.Мехтиева