

УДК 539.213:621.317

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЕМКОСТЕЙ В МОЩНЫХ СВЧ МОП ТРАНЗИСТОРАХ

© 2004 Б. К. Петров, П. А. Меньшиков, А. Н. Гашков, И. В. Семейкин, Ю. К. Николаенков

*Воронежский государственный университет*

В статье получены строгие аналитические выражения для расчета входной  $C_{вх}$ , выходной  $C_{вых}$  и проходной  $C_{зс}$  емкостей мощных СВЧ МОП транзисторов в зависимости от напряжения стока  $U_{си}$ . Проведена экспериментальная проверка этих соотношений на примере отечественного мощного балансного транзистора мощностью 150 Вт, рабочей частотой 500 МГц и напряжением питания  $U_{пит} = 28$  В. Расхождение теоретических данных с экспериментальными составляет не более 15 %.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в передающей ВЧ и СВЧ аппаратуре начали широко использоваться мощные генераторные СВЧ МОП транзисторы. Данный класс транзисторов в отличие от биполярных транзисторов имеет коэффициент усиления по мощности  $K_{ур}$  ( $\geq 10$  раз) и не подвержен тепловому вторичному пробою. Одними из важных мало-сигнальных параметров МОП транзисторов являются встроенные (геометрические) емкости: емкость исток–затвор  $C_{из}$ , которая определяет входную емкость  $C_{вх}$ ; проходная емкость затвор–сток  $C_{из}(C_{зс})$ ; емкость исток–сток  $C_{си}$ , которая определяет выходную емкость  $C_{вых}$ .

Параметры усилительных каскадов на МОП-транзисторе с общим истоком в значительной степени зависят от емкостей: входное сопротивление  $Z_{из}$  — от входной емкости  $C_{вх}$ ; коэффициент усиления по мощности  $K_{ур}$  — от проходной емкости  $C_{пр}(C_{зс})$ ; рабочая полоса частот — от выходной емкости  $C_{вых}$ .

Расчет емкостей мощного СВЧ МОП транзистора позволит спрогнозировать и оптимизировать параметры транзисторной структуры непосредственно на этапе разработки.

Формулы для расчета емкостей, представленные в литературе [1, 2] имеют ряд существенных недостатков. Их нельзя называть точными и универсальными, поскольку они содержат большое количество подгоночных коэффициентов. Отсутствуют так-

же зависимости емкостей от напряжения стока  $U_{си}$  и отсутствует сравнение рассчитанных значений  $C_{вх}, C_{вых}, C_{пр}$  с измеренными значениями.

Целью настоящей работы является: получение строгих аналитических выражений для расчета емкостей (входной  $C_{пр}(C_{iss})$ , выходной  $C_{вых}(C_{oss})$  и проходной  $C_{зс}(C_{sc})$ ) мощных СВЧ МОП транзисторов в зависимости от напряжения стока  $U_{си}$  и экспериментальная проверка этих соотношений на примере отечественного мощного балансного транзистора мощностью 150 Вт, рабочей частотой 500 МГц и напряжением питания  $U_{пит} = 28$  В (на одно плечо).

### МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Расчет проходной емкости  $C_{зс}$

Проходная емкость или емкость обратной связи  $C_{зс}(C_{sc})$  измеряется между выводами затвор–сток при условии короткого замыкания по переменному току между истоком и затвором.

Емкость  $C_{зс}$  состоит из: емкости  $C_{зконт}$  площадок на толстом окисле  $\text{SiO}_2$   $d_{\text{SiO}_2 \text{ толст}} = 1,8 \div 2$  мкм (см. рис. 1), емкости затворного окисла над  $n^-$ -областью истока между истоковыми  $p^-$ -ячейками — емкости затворных полосок  $C_{зполосок}$ .

Если контактные затворные площадки на толстом окисле находятся над диффузионными  $p$ -областями, соединенными с  $p^+$ -истоковыми ячейками, тогда емкость  $C_{зконт \text{ площадок}} = 0$  (условие короткого замыкания по переменному току между истоком и затвором).

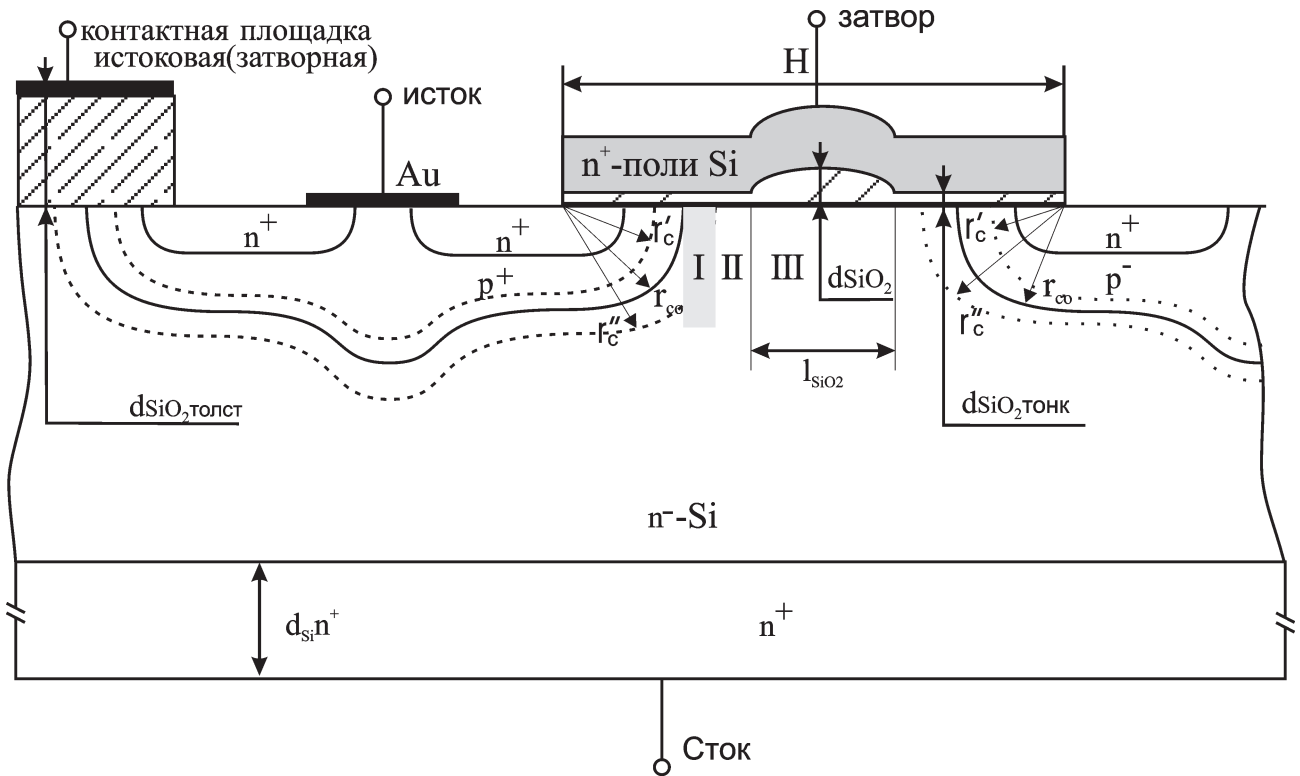


Рис. 1. Поперечное сечение мощного СВЧ МОП транзистора с вертикальной структурой

Остается вычислить емкость  $C_{зполосок}$  на окисле  $SiO_2$  толщиной  $d_{SiO_2} \approx 1$  мкм (рис. 1) с учетом наличия обедненного слоя из доноров в боковых участках  $p^+ - n$  переходов истоковых ячеек.

Уравнение Пуассона для цилиндрического  $p^+ - n$  перехода в  $n^-$ -области имеет вид.

$$\frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{d}{dr}(r \cdot |E(r)|) \right] = -\frac{qNd_n}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} \text{ при } (r_{co} = r = r_c^*) \quad (1)$$

или

$$\frac{d}{dr}(r \cdot |E(r)|) = -r \cdot \frac{qNd_n}{\epsilon_{Si}\epsilon_0}. \quad (1^*)$$

Интегрируем правую и левую части уравнения (1\*) в пределах от металлизированной границы  $r_{co}$  до  $r$  и находим напряженность поля.

$$|E(r)| = \frac{r_{co}}{r} \cdot |E(r_{co})| - \frac{1}{2} \left( r - \frac{r_{co}^2}{r} \right) \cdot \frac{qNd_n}{\epsilon_{Si}\epsilon_0}. \quad (2)$$

При  $r = r_c''$  (граница  $p^+ - n$  перехода с  $n^-$ -областью)

$$E(r'') = 0. \quad (3)$$

Следовательно, из (2) с учетом (3) получаем:

$$r_c'' = \sqrt{r_{co}^2 + \frac{2 \cdot \epsilon_{Si}\epsilon_0 \cdot r_{co}}{qNd_n} \cdot |E(r_{co})|}. \quad (4)$$

С помощью выражения (2) найдем падение напряжения на  $p^+ - n$  цилиндрическом переходе

$$\begin{aligned} V_{ис} + \phi_k &= \int_{r_{co}}^{r_c''} |E(r)| dr = \\ &= \int_{r_{co}}^{r_c''} E(r_{co}) \frac{r_{co}}{r} dr - \int_{r_{co}}^{r_c''} \frac{1}{2} \cdot \left( r - \frac{r_{co}^2}{r} \right) \cdot \frac{qNd_n}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} dr = \\ &= E(r_{co}) \cdot r_{co} \cdot \ln \left( \frac{r_c''}{r_{co}} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{qNd_n}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} \left[ \frac{(r_c'')^2 - r_{co}^2}{2} - r_{co}^2 \cdot \ln \frac{r_c''}{r_{co}} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) выражение (4), получим трансцендентное уравнение для нахождения максимального поля  $|E(r_{co})|$  через приложенное напряжение  $V_{ис}$ :

$$\begin{aligned} V_{ис} + \phi_k &= \left[ E(r_{co})r_{co} + \frac{1}{2} \frac{qNd_n}{\epsilon_{Si}\epsilon_0} r_{co}^2 \right] \times \\ &\times \ln \left( \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \epsilon_{Si}\epsilon_0}{qNd_n \cdot r_{co}} |E(r_{co})|} \right) - \frac{1}{2} r_{co} |E(r_{co})|. \end{aligned} \quad (6)$$

Затем из уравнения (4) можно определить границу  $r_c''$  истокового  $p^+ - n$  перехода с  $n^-$ -областью.

Рассмотрим составляющие проходной емкости  $C_{зс}$  при различных напряжениях.

При небольших напряжениях  $U_{си} \leq 1$  В, толщина обедненного слоя доноров (области пространственного заряда) в боковых частях  $p^+ - n$  перехода исток-сток невелика ( $r_c'' - r_{co}$ ) (область I на рис. 1). Емкость этой области  $C_I$  представляет собой емкость двухслойного конденсатора — тонкого окисла (толщиной  $d_{SiO_2 \text{ тонк}} \leq 0,1$  мкм,  $\epsilon_{SiO_2} = 3,85$ ) и обедненного слоя (ОПЗ) в кремнии с  $\epsilon_{Si} = 12$  и толщиной  $D_{ОПЗ}$ , и рассчитывается по формуле

$$C_I = \frac{\epsilon_{SiO_2} \epsilon_o X_{ОПЗ} \cdot P_k / 2}{d_{SiO_2 \text{ тонкого}} \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{SiO_2}} + D_{ОПЗ}}, \quad (7)$$

где  $X_{ОПЗ} = r_c'' - r_{co}$  — ширина обедненного слоя,  $D_{ОПЗ} = r_{co} + L_{p-n \text{ плоск}}$  — высота обедненной области, увеличивающиеся с ростом напряжения.  $P_k$  — периметр канала транзистора всех истоковых  $p^+$ -ячеек.  $L_{p-n \text{ плоск}}$  — ширина ОПЗ плоской части  $p^+ - n$  перехода.

Область II на рис. 1 — область МОП конденсатора на тонком окисле толщиной  $d_{SiO_2 \text{ тонк}} \leq 0,1$  мкм на квазинейтральном слое  $n$ -Si. Емкость этой области  $C_{II}$  вносит основной вклад в проходную емкость  $C_{зс}$  при небольших напряжениях

$$C_{II} = \frac{\epsilon_{SiO_2} \epsilon_o X_{МОПтонк} \cdot P_k / 2}{d_{SiO_2 \text{ тонкого}}}. \quad (8)$$

С ростом напряжения сток-исток  $U_{си}$  значение емкости  $C_{МОП \text{ тонк}}$  быстро убывает с уменьшением ширины  $X_{МОП \text{ тонк}}$ , и станет равным 0 по достижении границы ОПЗ —  $X_{ОПЗ}$  области III (см. рис. 1).

Область III — область МОП конденсатора с толстым окислом толщиной  $d_{SiO_2}$  на квазинейтральном слое  $n^-$ -Si. При малых напряжениях, емкость МОП конденсатора на толстом окисле  $C_{III}$  не зависит от напряжения  $U_{си}$  и определяется выражением:

$$C_{III} = \frac{\epsilon_{SiO_2} \epsilon_o l_{SiO_2 \text{ тонк}} \cdot P_k / 2}{d_{SiO_2}}. \quad (9)$$

С ростом напряжения, когда граница ОПЗ —  $X_{ОПЗ}$  достигнет области III, емкость

$C_{III}$  начнет убывать с уменьшением эффективной ширины обкладки МОП конденсатора.

Просуммировав все составляющие проходной емкости  $C_{зс}$ , была рассчитана и построена зависимость проходной емкости  $C_{зс}$  от напряжения стока  $U_{си}$  (рис. 2) на одно плечо для мощного (150 Вт) отечественного балансного МОП транзистора при значениях:  $d_{SiO_2} = 1$  мкм,  $N_{dn} = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_{SiO_2 \text{ тонк}} = 0,09$  мкм,  $r_{co} = 1,7$  мкм,  $P_k = 49,6$  см,  $l_{SiO_2 \text{ толст}} = 4,5$  мкм.

Расчет входной емкости  $C_{вх}$

Измерение емкости  $C_{вх}$  ( $C_{iss}$ ) производится между выводами затвор-исток при условии короткого замыкания по переменному току в цепи исток-сток, т.е. емкость  $C_{ис}$  закорочена.

$$C_{вх} = C_{зи} + C_{зс}. \quad (10)$$

Здесь емкость  $C_{зи}$

$$C_{зи} = \frac{\epsilon_o \cdot \epsilon_{SiO_2} (S_{n^+ \text{-канала}} + S_{\text{перекр. } n^+ \text{-областей}})}{d_{SiO_2 \text{ тонк.}}} + C_{\text{з конт. площадок}}, \quad (11)$$

где

$$C_{\text{з конт. площадок}} = \frac{\epsilon_o \cdot \epsilon_{SiO_2} (S_{n^+ \text{-канала}} + S_{\text{з конт. площадок}})}{d_{SiO_2 \text{ толст.}}}. \quad (12)$$

$C_{\text{з конт. площадок}}$  — емкость затворных контактных площадок на толстом окисле над диффузионными  $p$ -областями, соединенными с  $p^+$ -истоковыми ячейками.

Площадь канала —  $S_{n^+ \text{-канала}} = P_k \cdot l_k$ , где  $P_k$  — периметр канала, а  $l_k$  ( $\approx 1$  мкм) — длина канала.

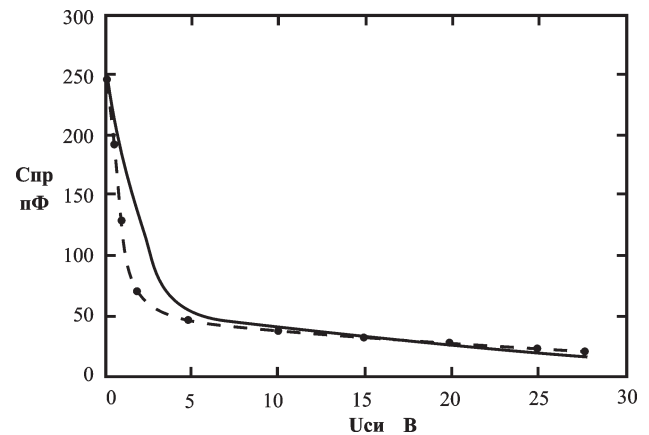


Рис. 2. Экспериментальная (пунктир) и теоретическая (сплошная линия) зависимости проходной емкости  $C_{пр}$  от напряжения стока  $U_{си}$

$S_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}}$  — площадь затвора, покрывающего  $n^+$ -области истока, находится из выражения  $S_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}} = \Delta d_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}} \cdot \Pi_{\text{к}}$ , где  $\Delta d_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}}$  — ширина перекрытия  $n^+$ -области затвором. В формуле (12)  $S_{\text{з конт. площадок}}$  — площадь затворных контактных площадок, которая определяется исходя из топологических размеров затворной металлизации.

Таким образом, можно найти значение емкости  $C_{\text{зи}}$

$$C_{\text{зи}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{SiO}_2} \left( \frac{S_{n^+ \text{-канала}} + S_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}}}{d_{\text{SiO}_2 \text{ тонк.}}} + \frac{S_{\text{з конт. площадок}}}{d_{\text{SiO}_2}} \right).$$

Зависимость входной емкости  $C_{\text{вх}}$  на одно плечо от напряжения стока  $U_{\text{си}}$  при значениях  $S_{\text{з конт. площадок}} = 3,34 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ ,  $\Delta d_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}} = 0,4 \text{ мкм}$  была рассчитана по предложенной методике и построена на рис. 3.

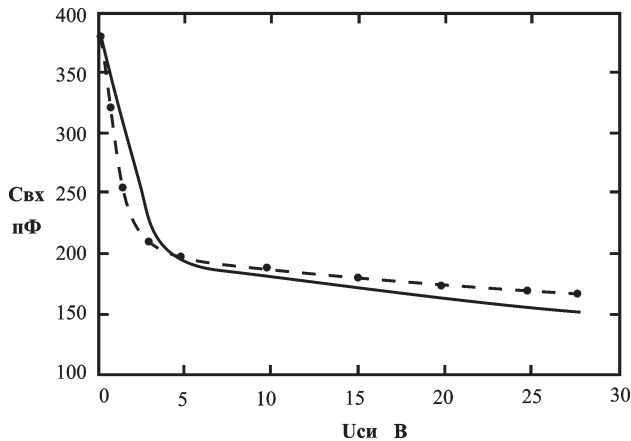


Рис. 3. Экспериментальная (пунктир) и теоретическая (сплошная линия) зависимости входной емкости  $C_{\text{вх}}$  от напряжения стока  $U_{\text{си}}$

Расчет выходной емкости  $C_{\text{вых}}$

Выходная емкость  $C_{\text{вых}} (C_{\text{OSS}})$  измеряется между выводами исток–сток при условии короткого замыкания по переменному току между затвором и истоком. Поэтому

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{ис}} + C_{\text{зс}} \quad (13)$$

В емкость  $C_{\text{ис}}$  входят емкости:  $C_{p^+ \text{-}n}(U_{\text{си}})$  — емкость  $p^+ \text{-}n$  перехода исток–сток истоковых  $p^+$ -ячеек и  $C_{\text{и метал.}}$  — емкость истоковой металлизации на толстом окисле относительно  $n$ -стока.

В емкости  $C_{p^+ \text{-}n}$  можно выделить емкости плоской и боковой части  $p^+ \text{-}n$  перехода исток–сток:

$$C_{p^+ \text{-}n} = C_{p^+ \text{-}n \text{ плоск. части}} + C_{p^+ \text{-}n \text{ бок. части}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{Si}} \cdot S_{\text{пл.}p^+ \text{-}n}}{L_{p^+ \text{-}n \text{ пл.}}(U_{\text{си}})} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{Si}} \cdot S_{\text{бок.}p^+ \text{-}n}}{L_{p^+ \text{-}n \text{ бок.}}(U_{\text{си}})}, \quad (14)$$

где  $S_{\text{пл.}p^+ \text{-}n}$  — площадь плоского основания  $p^+$ -истоковых ячеек,  $S_{\text{бок.}p^+ \text{-}n}$  — площадь боковых участков  $p^+$ -истоковых ячеек.

Емкость истоковой металлизации вычисляется по формуле

$$C_{\text{и метал.}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{SiO}_2} \cdot S_{\text{и метал.}}}{d_{\text{SiO}_2 \text{ толст.}}}, \quad (15)$$

где  $S_{\text{и метал.}}$  — определяется исходя из топологических размеров истоковой металлизации.

Для емкости  $C_{p^+ \text{-}n \text{ бок. части}}$  более строго надо использовать формулу для цилиндрического конденсатора:

$$C_{p^+ \text{-}n \text{ бок. части}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Si}} \cdot 2\pi \cdot z}{2 \cdot \ln \frac{r_c''(U_{\text{си}})}{r_c'(U_{\text{си}})}}, \quad (16)$$

где  $z \approx \Pi_{\text{к}}$  — полная длина всех боковых участков, множитель  $1/4$  учитывает тот факт, что боковые части  $p^+ \text{-}n$  переходов представляет собой четверть цилиндра.

Поскольку выходная емкость измеряется при условии короткого замыкания по переменному току между затвором и истоком необходимо также учесть вклад емкостей  $C_{\text{I}}$ ,  $C_{\text{II}}$ ,  $C_{\text{III}}$  и  $C_{\text{перекр.}n^+ \text{-областей}}$  в общую выходную емкость  $C_{\text{вых}}$ .

Зависимость выходной емкости  $C_{\text{вых}}$  от напряжения стока  $U_{\text{си}}$  изображена на рис. 4 при значениях  $S_{\text{и метал.}} = 1,58 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ ,  $C_{\text{бок. части}} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ

На рис. 5, 6 представлены электрические схемы, отражающие принцип измерения входной  $C_{\text{вх}} = C_{11}$ , проходной  $C_{\text{зс}} = C_{12}$  и выходной  $C_{\text{вых}} = C_{22}$  емкостей полевых транзисторов соответственно. Источник напряжения  $U$  обеспечивает требуемое напряжение питания. Измерение емкости проводится в два этапа.

На первом этапе (этап калибровки, ключ К — положение 2) тестовый сигнал от гене-

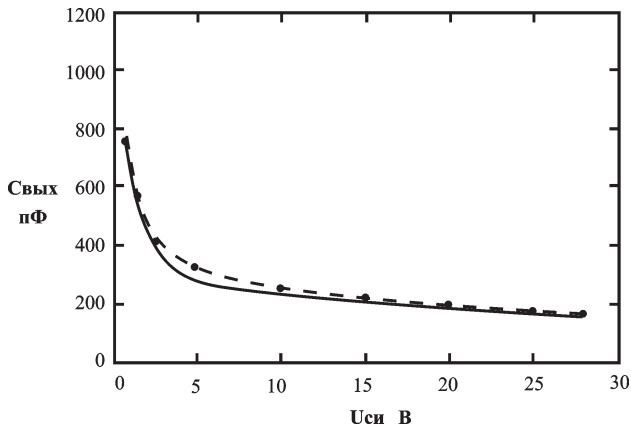


Рис. 4. Экспериментальная (пунктир) и теоретическая (сплошная линия) зависимости выходной емкости  $C_{\text{вых}}$  от напряжения стока  $U_{\text{си}}$

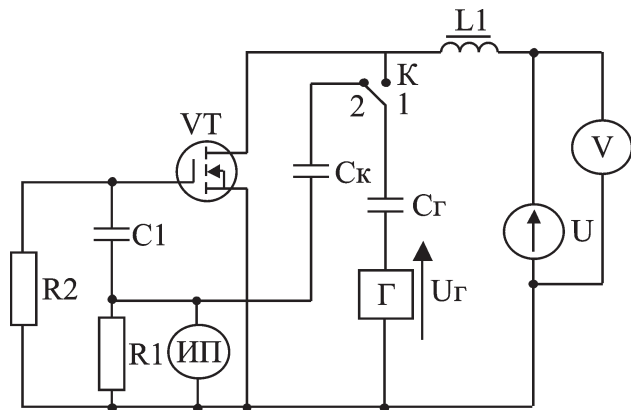


Рис. 6. Электрическая схема измерения проходной  $C_{\text{зс}}$  и выходной  $C_{\text{вых}}$  емкостей полевых транзисторов.  $C_1, C_{\text{г}}$  — разделительные конденсаторы;  $L_1$  — дроссель;  $R_1, R_2$  — резисторы;  $VT$  — измеряемый транзистор;  $\Gamma$  — генератор ( $f = 1 \text{ МГц}$ );  $U$  — источник напряжения;  $ИП$  — измерители напряжения;  $K$  — переключатель

ратора через разделительный конденсатор  $C_{\text{г}}$  подается на делитель напряжения, в верхнем плече которого находится калибровочный конденсатор известной емкости  $C_{\text{к}}$ , а в нижнем — резистор  $R_1$ , на котором измеряется падение напряжения  $U_{\text{к}}$ .

На втором этапе (этап измерения, ключ  $K$  — положение 1) тестовый сигнал от генератора через разделительный конденсатор  $C_{\text{г}}$  подается в стоковую цепь транзистора. При измерении входной емкости, выходная емкость шунтируется конденсатором  $C_{\text{б}}$  (см. рис. 5). При измерении выходной  $C_{\text{вых}}$  и проходной  $C_{\text{зс}}$  емкостей, входная  $C_{\text{вх}}$  емкость шунтируется конденсатором  $C_1$  (см. рис. 6).

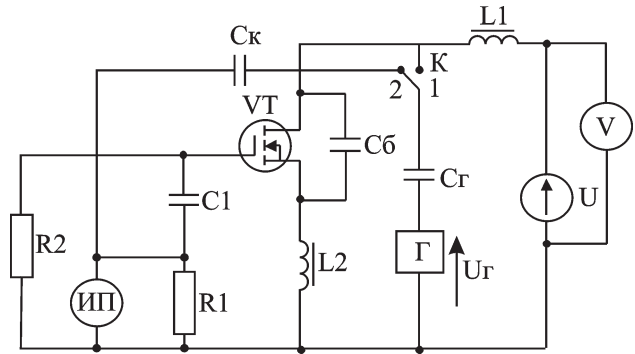


Рис. 5. Электрическая схема измерения входной емкости полевых транзисторов.  $C_1, C_{\text{г}}$  — разделительные конденсаторы;  $C_{\text{б}}$  — блокировочный конденсатор;  $L_1, L_2$  — дроссели;  $R_1, R_2$  — резисторы;  $VT$  — измеряемый транзистор;  $\Gamma$  — генератор ( $f = 1 \text{ МГц}$ );  $U$  — источник напряжения;  $V, ИП$  — измерители напряжения;  $K$  — переключатель

Таким образом, в делителе напряжения верхним плечом является измеряемая емкость  $C_x$ , нижним — резистор  $R_1$ . Падение напряжения  $U_x$  измеряется на резисторе  $R_1$ .

Напряжение  $U_{\text{г}}$  должно быть постоянным, номинал резистора  $R_2$  1 МОм.

Номинал резистора  $R_1$  выбирается из условия:

$$R_1 \leq \frac{0,01}{2\pi f C_x} \quad (17)$$

Напряжение  $U_{\text{г}}$  для положений ключа 1 и 2 определяется выражениями (18) и (19) соответственно:

$$U_{\text{г}} = U_x + \frac{U_x}{R_1} X_x, \quad (18)$$

где  $X_x = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_x}$ ,

$$U_{\text{г}} = U_{\text{к}} + \frac{U_{\text{к}}}{R_1} X_{\text{к}}, \quad (19)$$

где  $X_{\text{к}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{\text{к}}}$ .

Приравняв выражения (18) и (19), получим:

$$X_x = \frac{U_{\text{к}}}{U_x} X_{\text{к}} + R_1 \left( \frac{U_{\text{к}}}{U_x} - 1 \right) \quad (20)$$



Согласно (17), вторым слагаемым выражения (20) можно пренебречь, тогда измеряемая емкость определяется следующим образом:

$$C_x = \frac{U_k}{U_x} C_k. \quad (21)$$

Контактные устройства — сменные, соответствуют измеряемой емкости.

Погрешность измерений не превышает 10 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ20398.5-74 “Транзисторы полевые. Метод измерения входной, проходной и выходной емкостей”.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рассчитанные и измеренные зависимости емкостей  $C_{пр}$ ,  $C_{вх}$ ,  $C_{вых}$  от напряжения стока  $U_{си}$  приведены на рис. 2, 3, 4.

Из сравнения этих экспериментальных и рассчитанных кривых видно, что значения емкостей  $C_{пр}$ ,  $C_{вх}$ ,  $C_{вых}$  совпадают с точностью до ~15 %, что считается удовлетворительным при проведении инженерных расчетов. Расхождение с экспериментальными значениями емкостей может быть обусловлено рядом причин. Подзатворный окисел имеет полусферическую форму и неоднороден по толщине (рис. 1), а в расчетах использовалось приближение прямоугольной формы. Измерения емкостей при малых напряжениях ввиду больших значений этих емкостей имеют погрешность более 10 %. Таким образом, при малых напряжениях совпадение теоретических данных с экспери-

ментальными в области малых напряжений составляет ~15—20 %, а при напряжениях близких к  $U_{пит}$  ~10—15 %.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- в данной работе были получены простые формулы для расчета емкостей  $C_{вх}$ ,  $C_{вых}$ ,  $C_{пр}$ ;

- совпадение теоретических данных с экспериментальными в области малых напряжений составляет ~15—20 %, а при напряжениях близких к  $U_{пит} = 28 В$  ~10—15 %, что является приемлемым при проведении инженерных расчетов;

- основным достоинством предложенной методики расчетов является отсутствие подгоночных эмпирических коэффициентов, что делает ее более универсальной;

- полученную методику можно использовать при проведении инженерных расчетов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование и технология производства мощных СВЧ транзисторов / В. И. Никишин, Б. К. Петров, В. Ф. Сынов и др. — М.: Радио и связь, 1989. — 144 с.

2. Петров Б.К., Меньшиков П.А., Николаенков Ю.К. Расчет малосигнальных параметров современных мощных МОП транзисторов СВЧ диапазона с вертикальной структурой // Материалы докладов VIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» том 3, Воронеж, 23—25 апреля 2002 г., С. 2037—2041.

3. Кремниевые планарные транзисторы / В. И. Никишин, В. Ф. Сынов и др. Под ред. Я. А. Федотова — М.: Сов. Радио, 1973. — 336 с.