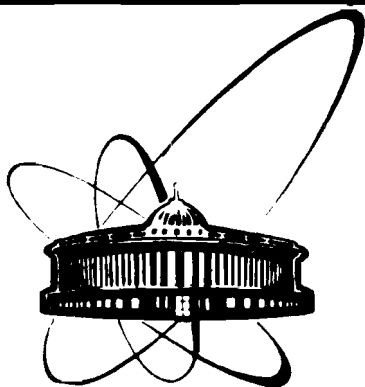


89-393



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

К 393

13-89-393

А. В. Корытов

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ БАЗЫ БИПОЛЯРНЫХ  
ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ ИЗМЕРЕНИЯ  
ШУМА СТРОБИРУЕМЫМ ИНТЕГРАТОРОМ

Направлено в журнал "Приборы и техника эксперимента"

1989

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Детекторы в физике высоких энергий, работающие при больших нагрузках  $/\geq 10^8 \text{ с}^{-1}/$ , требуют быстрых малошумящих предусилителей. При малых длительностях формирования выходного сигнала  $/\leq 100 \text{ нс}/$  эквивалентные шумы биполярных транзисторов оказываются меньше, чем у полевых <sup>/1/</sup>. Это связано с тем, что при малых временах формирования вклад последовательных источников шумов ( $E_s$ ) превышает вклад параллельных шумов ( $I_p$ ), а величина  $E_s$  для биполярных транзисторов меньше, чем для полевых /рис.1/.

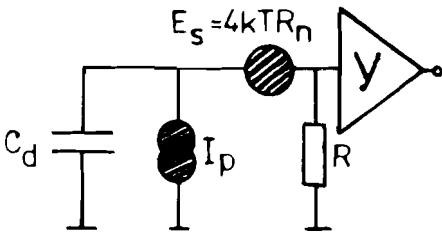


Рис.1. Схема эквивалентных шумов предусилителя.  $R$  - сопротивление утечки для полевого транзистора или входное сопротивление для схем на биполярных транзисторах;  $R_n$  - эквивалентное сопротивление последовательных шумов  $E_s$  /для полевого транзистора:  $R_n \sim 0,7/S \sim 70 \text{ Ом}$ , где  $S$  - крутизна, для биполярного

транзистора:  $R_n \sim r_{ВВ'} + \frac{1}{2g_m} \sim 20 \text{ Ом}/$ ;  $I_p$  - эквивалентный ток параллельных шумов /для полевого транзистора  $I_p \sim \max(I_{\text{утечки}}, \frac{2\phi_T}{R}) \sim 10 \text{ нА} \div 50 \text{ мкА}$  - определяется желаемым быстродействием; для биполярного транзистора  $I_p \sim I_{B1} \sim 5 \text{ мкА}/$ .

Источниками последовательных шумов биполярных транзисторов являются тепловой шум распределенного сопротивления базы: ( $e_{ВВ'}^2 = 4 \text{ кТ} r_{ВВ'}$ ) и дробовой шум тока коллектора ( $i_c^2 = 2q_0 I_c$ ):

$$E_s^2 = 4\text{кТ} r_{ВВ'} + \frac{2q_0 I_c}{g_m^2} = 4\text{кТ} \left( r_{ВВ'} + \frac{1}{2} \frac{1}{g_m} \right), \quad /1/$$

где  $g_m = \frac{q_0 I_E}{kT} = \frac{I_E}{\phi_T} \approx 25 \text{ мВ}$  - тепловой потенциал/. Второе

слагаемое хорошо определено, т.к. задается режимом по постоянному току, а первое определяется типом транзистора. К сожалению, как правило, значение  $r_{BB'}$  в справочниках не приводится.

Таким образом, выбор оптимального типа транзистора и отборка конкретных экземпляров требуют достаточно простой и модельно независимой методики определения  $r_{BB'}$ . Пример такой методики /с использованием селективного вольтметра/ есть в работе /2/.

В данной работе описана методика, не требующая специального оборудования, кроме стробируемого интегратора - прибора, который широко используется при работе с зарядочувствительными детекторами в физике высоких энергий.

## 2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В основу метода положено использование стробируемого интегратора. Подробный анализ шумов при использовании стробируемого интегратора для этого случая был сделан в работе /3/. При естественном условии, что сигнал с выхода предусилителя должен уместиться в интервале стробирующего импульса, т.е.  $T_1 \ll T$ , где  $T_1 = R_{in} \cdot C_d$ ,  $T$  - время интегрирования, а также считая, что  $T_2 \ll T_1$ , где  $T_2$  - фронт предусилителя, выражение для эквивалентного шумового заряда запишем в виде:

$$ENC^2 = q_0 I_p T + 2q_0 \phi_T \frac{R_n}{R_{in}} C_d = ENC_p^2 + 2q_0 \phi_T \cdot \frac{r_{BB'} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{g_m}}{R_{in}} C_d, /2/$$

где  $q_0$  - заряд электрона;  $I_p$  - эквивалентный источник параллельных шумов;  $T$  - время интегрирования;  $\phi_T$  - тепловой потенциал / $\phi_T \approx 25 \text{ мВ}$ /;  $R_n$  - эквивалентный источник последовательных шумов ( $e_g^2 = 4kTR_n$ );  $R_{in}$  - входное сопротивление предусилителя;  $C_d$  - емкость детектора. Таким образом, по измерениям зависимости дисперсии шума от емкости  $C_d$  можно определить  $r_{BB'}$ .

Схема измерений приведена на рис.2. Генератор формирует стробирующий импульс для интегрирования, а также на вход предусилителя подает токовые импульсы /с помощью них калибровался весь тракт измерений: предусилитель - усилитель - интегратор/. Конденсатор  $C_d$  имитировал емкость детектора.

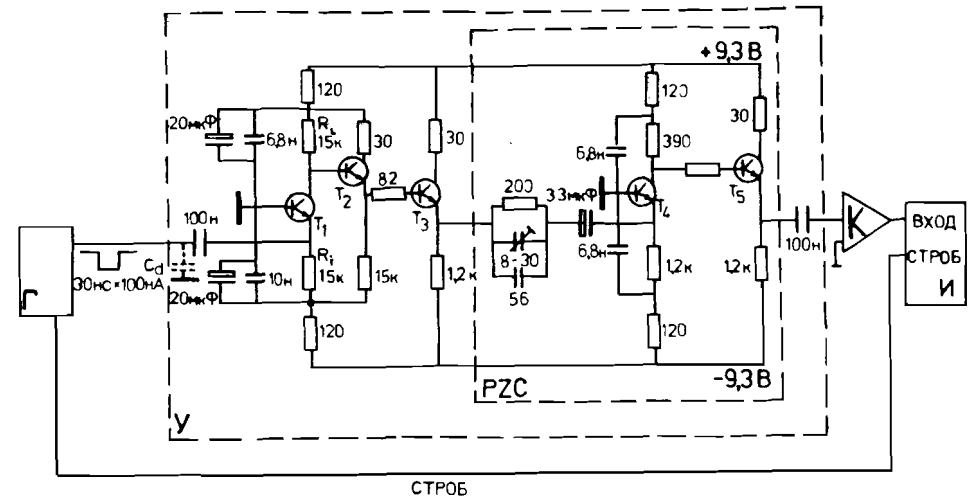


Рис.2. Схема измерений: Г - генератор, У - предусилитель / $I_{E1} = 0,55 \text{ мА}$ ,  $I_{E2} = 0,63 \text{ мА}$ ,  $\beta_1 \approx \beta_2 \approx 80$ ,  $T_2 \leq 3 \text{ нс}$ /; PZC - цепочка компенсации полюса нулем; К - усилитель; И - стробируемый интегратор; T1 ÷ 5 - транзисторы КТ 3101А-2.

По зависимости дисперсии набранных зарядовых спектров от емкости  $C_d$  определялось  $r_{BB'}$ .

Предусилитель был собран по схеме ОБ-ОК /рис.2/. Из трех традиционных схем /4/ ОЭ-ОК, ОБ-ОК, ОЭ-ОБ-ОК эта схема имеет одно важное отличие - хорошо определенное входное сопротивление, которое задается режимом по постоянному току ( $R_{in} = \frac{\phi_T}{I_{E1}}$ ).

Это имеет принципиальное значение для описываемого метода.

В предусилитель также введена стандартная схема компенсации полюса нулем (PZC). Полюс возникает из-за наличия паразитной емкости, параллельной сопротивлению  $R_L$ , что ограничивает верхнюю граничную частоту предусилителя. В результате выходной сигнал предусилителя имеет фронт  $T_2 \leq 3 \text{ нс}$ .

Подробный анализ шумов для схемы ОБ-ОК приведен в работе /5/. Эквивалентный параллельный шумовой ток равен:

$$I_p = I_{B1} + I_{B2} + \frac{2\phi_T}{R_i} + \frac{2\phi_T}{R_L}, /3/$$

где  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$  - токи базы 1-го и 2-го транзисторов, а эквивалентное шумовое сопротивление равно:

$$R_n = r_{BB'} + \frac{1}{2} \frac{\phi_T}{I_{E1}}, \quad /4/$$

где  $I_{E1}$  - ток эмиттера первого транзистора.

Таким образом, зависимость  $ENC^2$  от  $C_d$  линейная, и коэффициент наклона определяется двумя величинами  $I_{E1}$  и  $r_{BB'}$ , первая из которых четко фиксируется режимом по постоянному току. Это позволяет по измерению  $ENC^2$  при двух различных  $C_d$  определить  $r_{BB'}$ .

### 3. ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Иллюстрацией для формулы /2/ могут служить результаты измерений, приведенные на рис.3,4. Рис.3 показывает зависимость  $ENC$  от времени интегрирования  $T$  при  $C_d = 0$ . Так, при  $T=100$  нс  $ENC \approx 4000$  е /расчет дает значение 3700 е, т.е. согласие вполне удовлетворительное/. Рис.4 показывает зависимость  $ENC$  от емкости детектора  $C_d / T = 210$  нс/:  $ENC_s^2 = (450 \text{ е})^2 \cdot C_d / \text{пф}/$ , что дает значение  $r_{BB'} \approx 7,1$  Ом.

Таким образом, при отлаженной методике, для определения  $r_{BB'}$  достаточно измерения эквивалентного шумового заряда при двух различных емкостях. Меняя транзистор  $T_1$  в предусилителе, такие измерения  $r_{BB'}$  мы провели для случайных выборок транзисторов КТ 3101А-2, КТ 391А-2; КТ 3102Б. Результаты приведены на рис.5 /заметим, что  $r_{BB'}$  транзисторов КТ 391 измерялось в работах /8,7/, где были получены результаты  $r_{BB'} = 15$  и  $24$  Ом соответственно/.

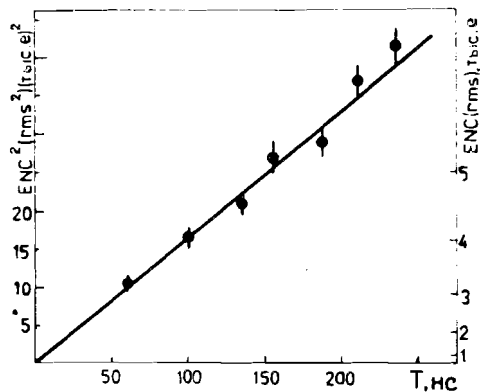


Рис.3. Зависимость  $ENC$  от времени интегрирования  $T$  при  $C_d = 0$  пФ. Измерения для транзистора КТ 3101А-2. Прямая  $ENC^2 = (400 \text{ е})^2 T / \text{нс}/$  проведена "на глаз".

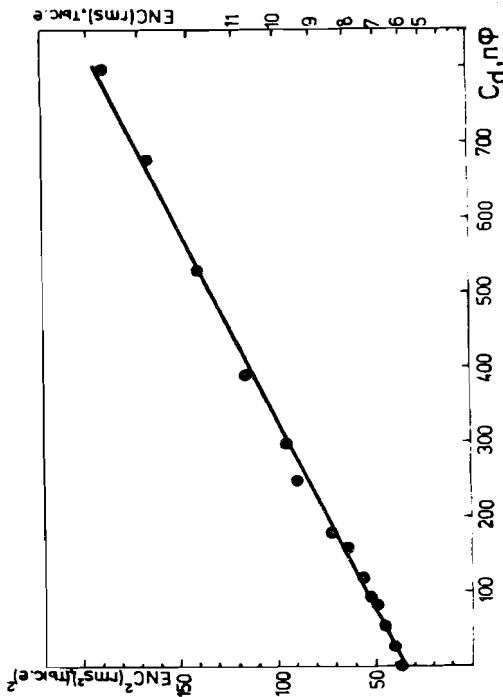


Рис.4. Зависимость  $ENC$  от емкости детектора  $C_d$  при времени интегрирования  $T = 210$  нс. Измерения для транзистора КТ 3101А-2. Прямая  $ENC^2 \approx 5800 \text{ е}^2 + /450 \text{ е}^2 C_d / \text{пф}/$  проведена "на глаз".

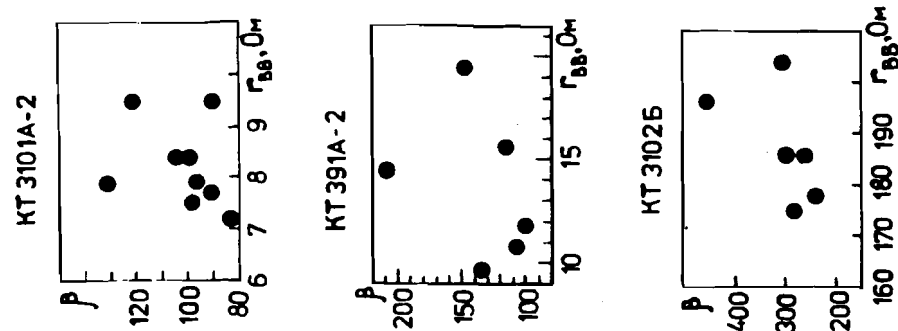


Рис.5. Зависимость  $r_{BB'}$  от  $\beta$  для выборок транзисторов КТ 3101А-2 / $r_{BB'} = 8,4$  Ом/, КТ 391А-2 / $r_{BB'} = 14$  Ом/, КТ 3102Б / $r_{BB'} = 190$  Ом/.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный метод позволяет легко отбирать транзисторы по значению  $\Gamma_{ВВ'}$  без организации дополнительной аппаратуры, кроме той, что обычно имеется на методических стендах для работы с детекторами ядерной физики.

На основе сделанных измерений можно заключить, что транзистор КТ 3101А-2 / $f_{\alpha} = 4,5$  ГГц/<sup>8/</sup> является одним из лучших по значению  $\Gamma_{ВВ'}$  среди бескорпусных сверхвысокочастотных транзисторов, и находится на уровне биполярных транзисторов высокого класса /например, для НЕ 680  $\Gamma_{ВВ'} \sim 10$  Ом/<sup>10/</sup>, для КТ 399 и КТ 640  $\Gamma_{ВВ'} \sim 7$  Ом/<sup>7/</sup>.

Для иллюстрации приведем характеристики предусилителя, собранного по схеме ОЭ-ОК<sup>4/7</sup> с этим транзистором. Эта схема более оптимальна для малшумящего предусилителя, чем схема ОБ-ОК, так как параллельный шум для нее определяется эквивалентным током:

$$I_p = I_{В1} + \frac{2\phi_T}{R_f}, \quad (ср. (3)), \quad /5/$$

где  $R_f$  - сопротивление обратной связи. Предусилитель имел следующие параметры / $I_{E1} \sim 0,5$  мА,  $R_f = 27$  кОм/:  $T_p \leq 3$  нс /исключенные полюса  $P = \frac{1}{R_f C_f}$ , где  $C_f$  - паразитная емкость, осуществлялась методом компенсации полюса нулем/;  $R_{in} = 280$  Ом;  $ENC = 210 e\sqrt{T/нс} \oplus 180 e\sqrt{C/пФ}$ , где знак  $\oplus$  означает квадратичное сложение; шумовая дорожка по осциллографу /граничная частота 400 МГц/  $\sim 60$  нА.

Автор выражает благодарность П.А.Кулиничу и Ш.Целлару за многочисленные полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Манфреди П.Ф. - ЭЧАЯ 15/5/, 1984, с.982.
2. Краснокутский Р.Н. и др. - ПТЭ, 1986, № 6, с.111.
3. Deighton M.O. - NIM 58, 1968, p.201.
4. D'Angelo P. et al. - NIM 193, 1982, p.533.
5. Hrisono A. - NIM 185, 1981, p.207.
6. Корнильев Г.Э., Кузьмин В.В. - В сб.: "Микроэлектроника и полупроводниковые приборы". М.: Сов.радио, 1977, вып.2, с.126.

7. Краснокутский Р.Н. и др. - ПТЭ, 1988, № 5, с.118.
8. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986, с.393.
9. Курчанинов Л.Л. и др. - Препринт ИФВЭ 86-102-Серпухов, 1986.
10. Manfredi P.F. et al. - NIM A274, 1986, p.477.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 июня 1989 года.