

НЧ шум GaAs квазибаллистических полевых транзисторов малой мощности с V-образным затвором Шотки

А.В.Беляков, А.В.Моряшин¹⁾, С.В.Оболенский²⁾, М.Ю.Перов, А.В.Якимов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

М.А.Китаев

*Научно-исследовательский институт «Салют»,
Нижний Новгород 603600, Россия*

Л.К.Дж.Фандамме

Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, The Netherlands

Приведены результаты измерений $1/f$ шума в GaAs квазибаллистических полевых транзисторах малой мощности с V-образным затвором Шотки. Для омической области исследовались две зависимости шумовых характеристик, первая – от напряжения на затворе или от сопротивления канала, и вторая – от напряжения сток-исток или от тока через канал.

Введение

В сентябре – октябре 2002 были проведены совместные исследования низкочастотных шумов различных GaAs приборов в Эйндховенском технологическом университете (Нидерланды). Для GaAs квазибаллистических полевых транзисторов с V-образным затвором Шотки малой мощности измерялись зависимости характеристик $1/f$ шума от напряжения на затворе. Посредством предварительных исследований вольтамперных характеристик выявлялись значения изменяемых параметров (напряжение на затворе и напряжение сток-исток), для которых зависимость тока через канал от приложенного напряжения сток-исток описывается законом Ома. Для полученных значений параметров, т.е. в омической области проводились дальнейшие шумовые исследования. Для одного из образцов, дополнительно, при двух значениях напряжения на затворе измерялась зависимость шума от напряжения сток-исток.

Измерительная установка

Блок-схема установки приведена на рис.1. Она состоит из предварительного малозумящего усилителя Ultra – Low Noise Preampifier 5004 с эквивалентным входным шумовым сопротивлением 36 Ом, усилителя Precision AC Amplifier 9452, предназначенных для усиления шумового напряжения до уровня, необходимого для оптимального использования аналого-цифрового преобразователя; буферного каскада Buffer Amplifier BUF 634, согласующего выход усилителя Precision AC Amplifier 9452 с входом АЦП, и модуля аналогового ввода/вывода ADS224x48, преобра-

¹⁾ Тел.: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: moryashin@rf.unn.ru

²⁾ Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

зующего сигнал в цифровой код с последующей записью его на жесткий диск. Анализ шумовых записей производился при помощи специально разработанного многофункционального анализатора, выполненного в программной среде LabVIEW [1].

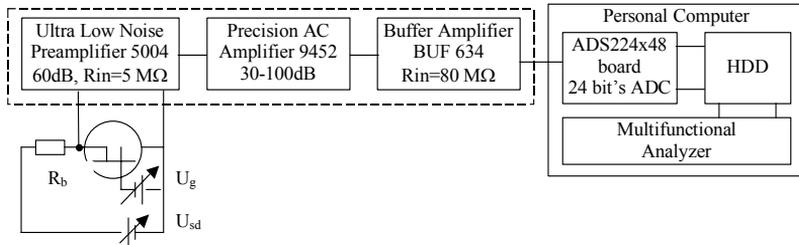


Рис.1. Блок-схема измерительной установки

Описание исследуемого прибора

Исследовались *GaAs* квазибаллистические полевые транзисторы с V-образным затвором Шотки, изготовленные в НИИ “Салют” (Конечный Пользователь 3). Особенностью этих приборов является существенное уменьшение длины канала до размеров удвоенной величины обедненной области, создаваемой барьером Шотки, [2]. Эффективная длина затвора варьировалась от 25 нм (для маломощных) до 50 нм (для мощных), уровень легирования канала составлял $6 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$, что обеспечивало минимальную длину канала около 100 нм. Схематическое представление транзистора с указанием обозначений характерных размеров дано на рис.2. Основные параметры транзисторов отображены в таблице 1. На рис.12 изображено поперечное сечение с указанием концентраций основных носителей.

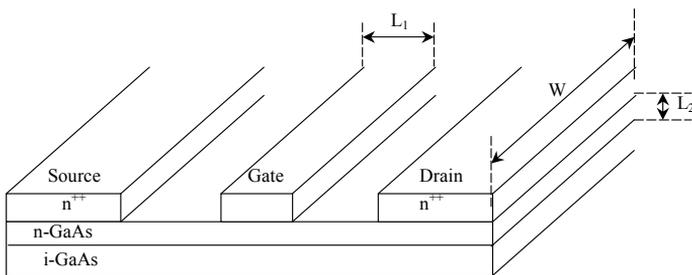


Рис. 2. Схематическое представление транзистора

Транзисторы изготовлены с применением электронной литографии и представляют собой набор эквивалентных секций шириной 25 мкм. Для изготовления ПТШ n^+-n-n^- -*GaAs*-структуры с характерной величиной переходной области канал-буферный слой ($n-n^-$) около 0,15 мкм применялась традиционная газотранспортная

эпитаксия. Использование анизотропного травления в растворе $NH_4OH: H_2O_2: H_2O = 1:0,5:25$, позволило изготовить V-канавку в активном слое $GaAs$ -структуры и, в совокупности с методом самосовмещения при напылении металлизации затвора, обеспечило получение эффективной длины затвора менее 30 нм. Точность ориентации топологии изготавливаемого прибора относительно кристаллографических направлений исходной полупроводниковой пластины составляла $\pm(3-5)^\circ$. При изготовлении образцов применялся электронный резист типа ЭЛП-13. Резист наносился слоем толщиной 0,35 мкм и высушивался при температуре 170 °С в течение 30 мин. Экспонирование проводилось на установке электроннолучевого экспонирования ZBA-21 с диаметром электронного пучка 0,1 мкм. Для проявления использовалась смесь метилэтилкетона и изопропилового спирта.

Таблица 1

Main parameters of transistors

FETs type	L_1 (Gate) mkm	n-channel, n-GaAs, cm^{-3}	L_2 mkm	Section width, W mkm	N sections	Ud limit, V	Ug limit, V
Low noise	0.25	$5-6 \cdot 10^{17}$	0.2	25	2	1.5 – 2.5	- 1.8

На рис.3 представлен микроснимок поперечного сечения транзистора с длиной затвора в два раза большей, чем у описываемых образцов, сделанный при помощи растрового электронного микроскопа JEOL.

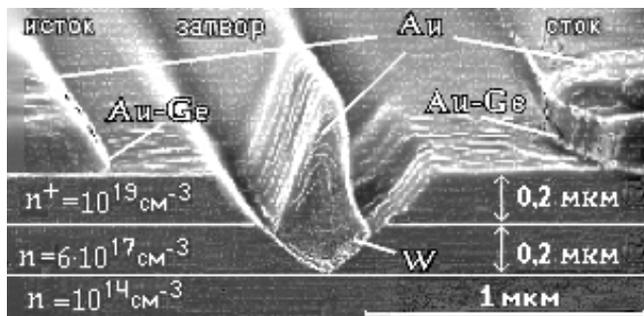


Рис. 3

Микрофотоснимок поперечного сечения полевого транзистора с V-образным затвором, полученный на растровом электронном микроскопе JEOL

Полученные результаты

Для анализа и правильного истолкования шумовых характеристик важно заранее подобрать оптимальный режим работы прибора. На рис.4 представлены ВАХ, измеренные для всего диапазона U_{sd} при нескольких значениях U_g [3]. Серым цветом выделена область, внутри которой проводятся шумовые измерения.

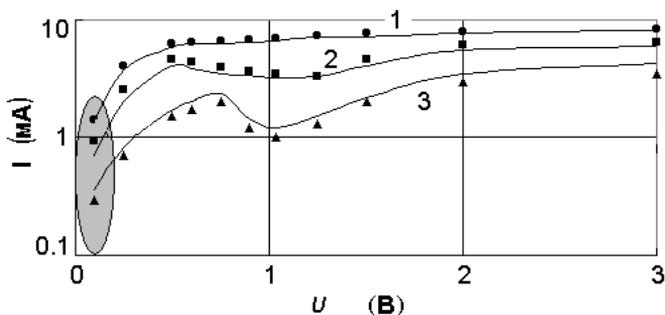


Рис. 4

Вольтамперные характеристики. Линия 1 соответствует напряжению на затворе, равному $-0,4$ В; линии 2, 3, соответственно, $-0,8$ В и $-1,8$ В

1. Зависимость от напряжения на затворе

ВАХ, полученные для образца 2, представлены на рис.5. По ним определялся диапазон напряжений сток–исток, при которых зависимость тока от напряжения имеет омический характер. Минимальное дифференциальное сопротивление при $U_g = 0$ можно приблизительно принять за сопротивление пассивных участков транзистора и контактов. Для большинства образцов оно порядка $16\text{--}20$ Ом. Более точную оценку можно сделать, определив напряжение запирака. Вычисляя дифференциальное сопротивление канала для каждого значения U_g , удалось получить зависимость, изображенную на рис.6. Она имеет сходную форму для всех приборов: при малых значениях напряжения, приложенного к затвору (до -1 В, половина напряжения запирака канала), сопротивление меняется всего на $10\text{--}20$ Ом. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к быстрому уменьшению подвижности. В области предпологаемого напряжения запирака наблюдается третий характерный участок.

Обработка результатов шумовых измерений показала, что шумовые зависимости обладают хорошей повторяемостью для всех образцов. Диапазон изменения напряжения на затворе равен $0 \div (-1,3)$ В, что эквивалентно изменению сопротивлению канала от $16\text{--}20$ Ом до $40\text{--}50$ Ом в зависимости от образца. Транзистор номер 2 исследовался в более широких пределах, для него U_g изменялось от 0 В до $-1,8$ В (20 Ом – 4 кОм). В связи с тем, что сопротивление канала однозначно выражается через напряжение на затворе, дальнейшие графики, отображающие измеренные зависимости шумовых параметров от U_g , будут представлены как функции от R_{sd} .

На рис.7,8 отображен параметр формы спектра Γ для двух диапазонов сопротивления канала. В первом наблюдались следующие характерные особенности. При нулевом напряжении на затворе (сопротивление $18\text{--}20$ Ом) наклон меньше 1, примерно $0,8$. Для всех образцов, кроме 1 и 4, имеется характерный куполообразный участок, верхняя граница которого совпадает с точкой перегиба на графике “проводимость канала – напряжение на затворе” и равна примерно 30 Ом. При дальнейшем увеличении сопротивления параметр формы стремится к 1. Макси-

мальное значение на куполообразном фрагменте достигается при 20–25 Ом и лежит в пределах от 1 до 1,2. На дополнительном участке, измеренном для транзистора 2, начиная с 50 Ом, наблюдается подъем с выходом на новый уровень 1,1 (рис. 8).

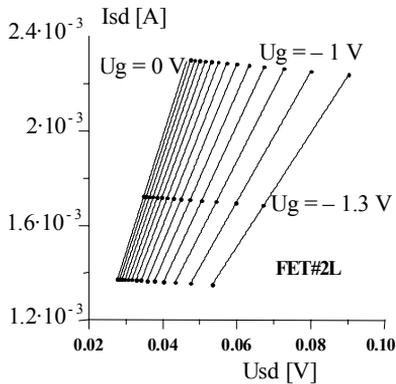


Рис. 5. Вольтамперные характеристики транзистора 2, полученные для значений напряжения на затворе, изменяющегося от 0 до -1,3 В с шагом 0,1 В

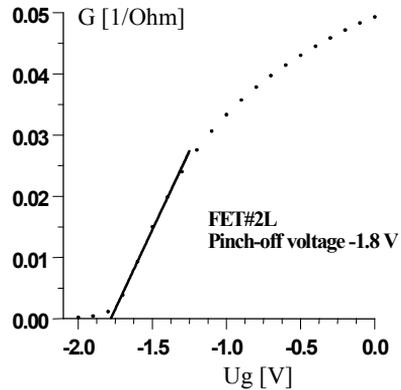


Рис. 6. Зависимость проводимости канала транзистора 2 от напряжения на затворе

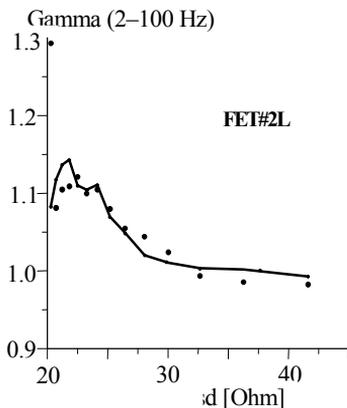


Рис. 7. Зависимости параметра формы спектра транзистора 2 от сопротивления канала, измеренные в диапазоне 20–45 Ом. Точки соответствуют данным, полученным 14 октября, а линия – 22 октября 2002 года

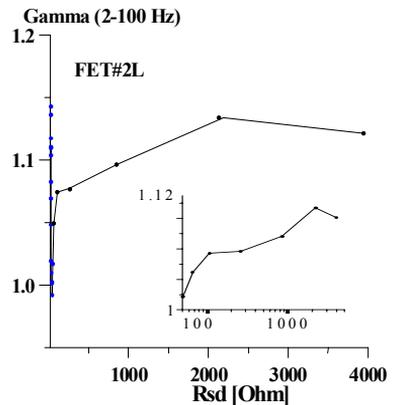


Рис. 8. Зависимость $\Gamma(R_{sd})$, измеренная 22 октября для диапазона 50 Ом – 4 кОм. На вставке изображена она же, но в полулогарифмическом масштабе

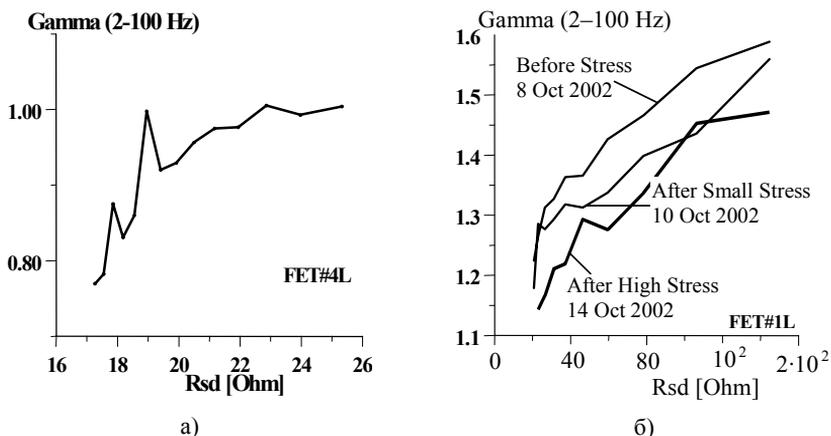


Рис. 9. Зависимости параметра формы спектра от сопротивления канала, полученные: (а) для транзистора 4; (б) для транзистора 1

У транзистора 4 вместо куполообразного участка наблюдается плавное нарастание γ до 1 с несколькими выбросами, (рис.9а). Для транзистора 1 получено самое необычное поведение: рост от 1,1 до 1,6 во всем диапазоне сопротивлений (рис.9б, верхняя линия). После нескольких дней работы транзистора под нагрузкой значение γ заметно уменьшилось, средняя линия, а еще через 4 перешло в нижнюю линию. Предполагается, что этот образец был предоставлен нетренированным, поэтому другие результаты шумовых измерений, полученные для него, здесь не приводятся.

В зависимости спектра шумов от сопротивления канала можно выделить две точки перегиба, соответствующие 30 Ом и 50 Ом, рис.10. В первой наклон меняется с 8 – 6 на 4,6 – 2,6 в зависимости от транзистора, а при переходе через вторую уменьшается до 1. При этих же значениях сопротивления наблюдаются перегибы и на других графиках $G(U_g)$ и Γ (R_{sd}), где $G = 1/R_{sd}$. Быстрое нарастание спектра на первом участке связано с квазибаллистическим движением электронов в канале. На втором и третьем участке зависимости приблизительно совпадают с результатами, полученными для

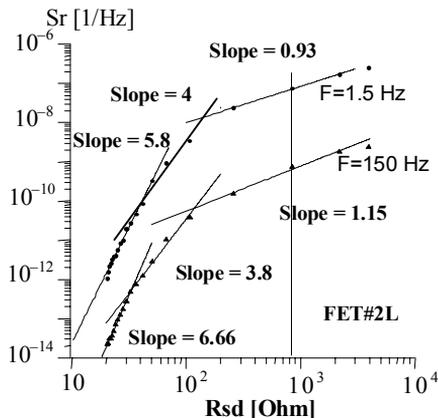


Рис. 10. Зависимость спектра флуктуаций сопротивления канала от его величины, измеренная для транзистора 2

полевых транзисторов, согласно которым наклоны должны быть равны 3 и 1 [4]. Наблюдаемое завышенное значение на втором фрагменте 3,8–4, вероятнее всего, получается из-за того, что на ее начальном этапе, часть электронов продолжает движение через канал без соударений. Вертикальная линия соответствует значению сопротивления, при котором, как предполагается, происходит запираение канала.

2. Токовые зависимости

Исследование зависимостей от тока проводилось при двух значениях напряжения на затворе. Соответствующие вольтамперные характеристики изображены на рис.11.

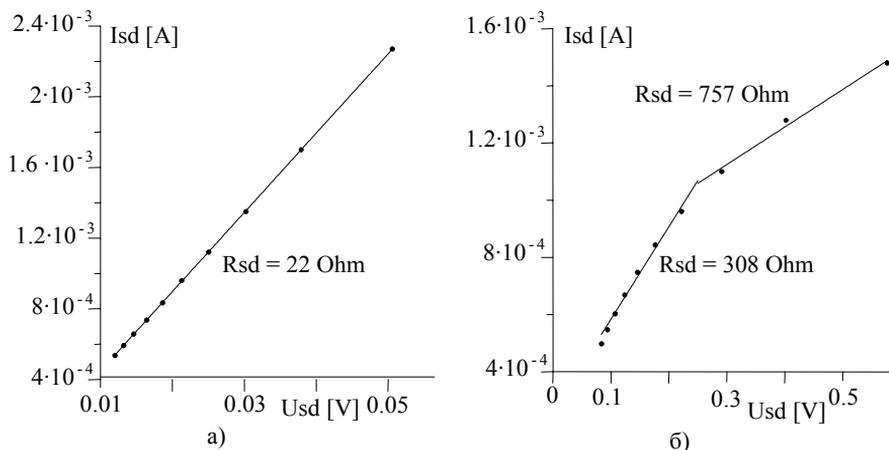


Рис. 11. Ветви вольтамперных характеристик для: (а) $U_g = -0,4 \text{ В}$; (б) $U_g = -1,8 \text{ В}$

При $U_g = -0,4 \text{ В}$ во всем диапазоне напряжений сток–исток сопротивление канала принимает постоянное значение, равное 22,45 Ом. При $U_g = -1,8 \text{ В}$ с увеличением напряжения наблюдается возрастание сопротивления канала более чем в два раза. Это объясняется тем, что при больших отрицательных напряжениях, когда транзистор практически закрыт, ток прибора определяется током утечки через буферный слой. При малых напряжениях на стоке усредненная траектория движения носителей заряда, в основном, проходит в области с малым уровнем легирования (траектория 1 на рис.12), а при увеличении напряжения на стоке получаем траекторию, обозначенную цифрой 2. Существенная (несколько порядков) разница в концентрации примеси приводит к уменьшению в 1,2–1,4 раза средней скорости движения носителей заряда в канале, что, в свою очередь, ведет к увеличению сопротивления.

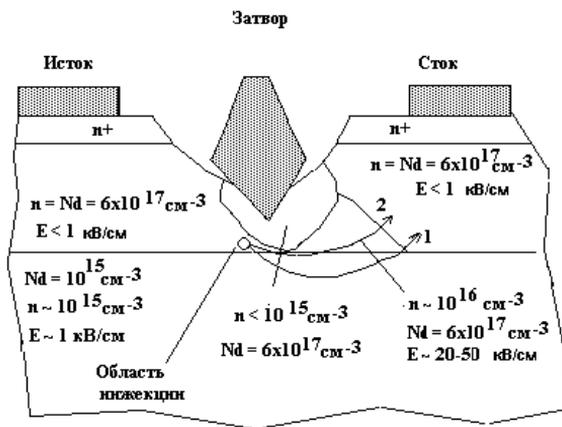


Рис. 12

Схематическое изображение поперечного сечения ПТШ с V-образным затвором

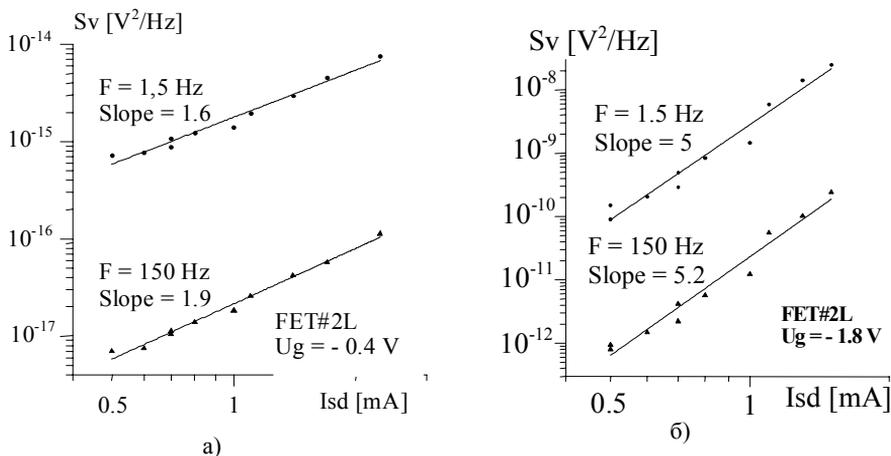


Рис. 13. Зависимости спектральной плотности мощности шумового напряжения от тока, протекающего через канал: (а) при $U_g = -0,4 \text{ В}$; (б) при $U_g = -1,8 \text{ В}$

Измеренные токовые зависимости спектральной плотности мощности шума и параметра формы спектра отображены на рис.13 и 14. Ток изменялся в диапазоне 0,4 мА – 2 мА. При $U_g = -0,4 \text{ В}$ зависимость спектра выражается степенным законом с показателем степени, близким к двум (1,6 – 1,9), что свидетельствует об омиче-

ском характере, γ при этом изменяется в пределах нескольких сотых. Полученная зависимость описывается формулой Хоухе [5] с параметром $\alpha \approx 7,6 \cdot 10^{-9}$.

При $U_g = -1,8$ В показатель степени близок к пяти (5 – 5,2), вероятнее всего из-за токов утечки через буферный слой. Переход к удвоенному сопротивлению сильно повлиял на поведение параметра формы спектра, который уменьшился с 1,12 до 1,08 и стал более стабильным. Параметр Хоухе для первой ветви равен $\alpha \approx 2,5 \cdot 10^{-7}$, для второй – $1,3 \cdot 10^{-7}$.

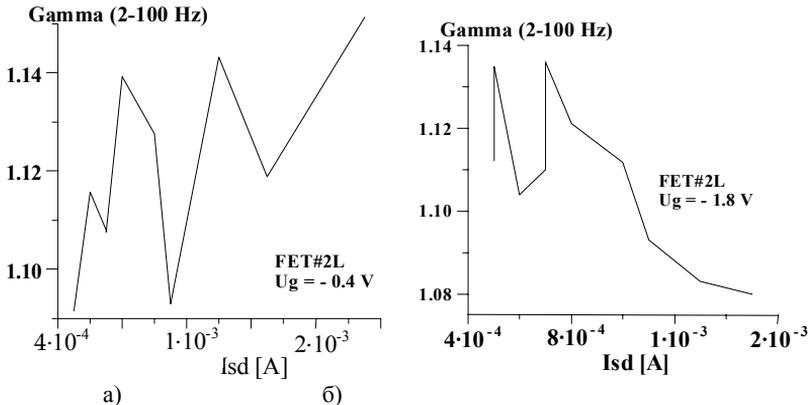


Рис. 14. Зависимость параметра формы спектра от тока, протекающего через канал: (а) при $U_g = -0,4$ В; (б) $U_g = -1,8$ В

Заключение

Проведено исследование $1/f$ шума в *GaAs* квазибаллистических полевых транзисторах с V-образным затвором Шотки. Выявлены особенности, проявляющиеся в зависимостях спектральной плотности мощности и параметра формы спектра от сопротивления канала, вызванные квазибаллистическим движением электронов в канале. Изучение токовой зависимости при напряжении на затворе, близком к напряжению запирания канала, позволило пронаблюдать изменения, вызванные токами утечки через буферный слой.

Работа выполнена при поддержке Отделения Науки НАТО, программа “Наука для Мира”, грант SfP-973799 Semiconductors между университетами Нижнего Новгорода и Эйндховена, как партнерами, а также при поддержке грантов РФФИ № 01-02-16666, № 02-02-06298 и “Ведущие научные школы” № 00-15-96620.

Литература

- [1] Андронов А.А., Беляков А.В., Гурьев В.А., Якимов А.В. “Интерактивная визуальная разработка приложений автоматизации научных и промышленных измерительно-управляющих систем в среде LabVIEW 6i National Instruments” // В кн.: Труды 2-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Полупро-

- водники. Апрель 2002 г. /Ред. А.В.Якимов. –Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2002, с.38–46;
- A.A.Andronov, A.V.Belyakov, V.A.Guryev and A.V.Yakimov. “The interactive visual development of applications of automation scientific and industrial measuring and control systems by means of LabVIEW 6i National Instruments” //Proc. of the NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop, April 2002 /Ed. A.V.Yakimov. –Nizhni Novgorod: TALAM-Press, 2002, p.38–46; <http://www.rf.unn.ru/NATO/index.html>.
- [2] Оболенский С.В., Китаев М.А. Полевой транзистор с 30-нм затвором //Письма в ЖТФ. 2000, № 10. С.13–16;
- Obolensky S.V., Kitayev M.A. “Field-effect transistor with a 30-nm gate” //Pis'ma V ZhTF. 2000. No.10. P.13–16 (in Russian).
- [3] Оболенский С.В., Китаев М.А. Исследование процессов генерации в баллистическом полевом транзисторе //Микроэлектроника. 2001, № 1. С.10–15;
- Obolensky S.V., Kitayev M.A. “Investigation of generation processes in ballistic field-effect transistor”. Microelectronics. 2001. V.30, No.1. P.10–15 (in Russian).
- [4] Low-frequency noise in modern semiconductor transistors / by Hans Arie Wilhelmus Markus. Eindhoven University of Technology, 1997, p.99.
- [5] F.N.Hooge, T.G.M.Kleinpenning, and L.K.J.Vandamme. “Experimental studies on 1/f noise” //Reports on Progress in Physics. 1981. P.479–532.

Low-frequency noise in a quasi-ballistic small power GaAs FETs with V-shaped Schottky gate

A.V.Belyakov, A.V.Moryashin¹, S.V.Obolensky², M.Yu.Perov, A.V.Yakimov

Nizhni Novgorod State University, Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia

M.A.Kitayev

“SALYUT” the Research-and-Production Enterprise, Nizhni Novgorod 603600, Russia

L.K.J.Vandamme

Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, The Netherlands

Results of the 1/f noise measurements in quasi-ballistic low power GaAs FETs with V-shaped Schottky gate is reported here. FETs were made in the Research-and-Production Enterprise “SALYUT” (End User 3). Their main feature is essential decrease of channel length till the double size of the depleted area created by barrier Schottky. The effective gate length is equal 30 nm, a doping level of the channel is $6 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ and it has provided the minimal channel length about 100 nm. Parameters of transistors are presented in [Table 1](#). The micro picture of transistor cross cut, which were made by means of raster electronic microscope JEOL, is shown in [Fig.3](#).

Research of noise dependences was carried out for ohmic region.

¹) Тел.: +7-8312-656153; Fax: +7-8312-656416; E-mail: moryashin@rf.unn.ru

²) Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

1. Dependence on the gate voltage. The I–V characteristics for sample 2 are shown in [Fig.5](#). The range of the drain-source voltages at which the dependence of the channel current on the voltage has ohmic type was determined from these characteristics. The channel conductance dependence on the gate voltage U_g is represented in [Fig.6](#). Processing of the noise measurement results has shown, that noise dependences have a good repeatability for all devices. The range of the gate voltage change is $0 \div (-1.3)$ V. This is equivalent to the channel resistance change from 16–20 Ohm up to 40–50 Ohm, depending on the FET tested.

Transistor 2 was investigated in wider limits. The gate voltage U_g was changed from 0 V up to -1.8 V (20 Ohm – 4 kOhm) for it. Frequency exponent Gamma (γ) of the spectrum for two ranges of channel resistance is represented in [Figs. 7, 8](#). A characteristic dome-shaped site for all FETs, except 1 and 4 in the first range, can be seen. It probably corresponds to quasi-ballistic movement of electrons. The results of Gamma measurement for FET 1 showed that it was not trained. Dependence of the noise spectrum on the channel resistance is represented in [Fig.10](#). It consists of three parts. The first part has the biggest slope 6 – 8, which corresponds to quasi-ballistic movement of electrons. Dependences of the second and third fragments approximately coincides with the results obtained for field transistors according to which slopes should be equal 3 and 1, see [2]. The high value of slope on the second fragment (3.8 – 4), most likely, turns out that at its initial stage, the part of electrons move through the channel without impacts.

2. The dependences on current. The current was changing in the range 0.4 mA – 2 mA.

The dependences were measured at two meanings of the gate voltage. Appropriate volt–current characteristics are represented in [Fig.11](#). The channel resistance at $U_g = -0.4$ V is 22.45 Ohm. The channel resistance at $U_g = -1.8$ V is varied in two times. It is explained by outflow currents through a buffer layer, see lines 1 and 2 in [Fig.12](#). Measured dependences on the current are represented in [Figs. 13 and 14](#). At $U_g = -0.4$ V dependence of the spectrum is expressed by the power law with an exponent of two (1.6 – 1.9), that is described by Hooge’s formula [5] with $\alpha \approx 7.6 \cdot 10^{-9}$. At $U_g = -1.8$ V the exponent is close to five (5 – 5.2), perhaps due to the outflow currents. Transition to the double resistance region has strongly affected behavior of spectrum frequency exponent, which has decreased from 1.12 down to 1.08 and becomes more stable.

This work was supported by the NATO in the framework of the “Science for Peace” Project SfP-973799 with the universities of Nizhni Novgorod and Eindhoven as partners. The work was also supported by grants of RFBR 00-15-96620, 01-02-16666, and NSh-1729.2003.2 (Scientific Schools).