

Исследование отрицательной дифференциальной проводимости квазибаллистического полевого транзистора

С.В.Оболенский *

*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*

В.К.Киселев

*Научно-исследовательский институт измерительных систем,
Нижний Новгород, 603600, Россия*

Теоретически и экспериментально исследованы причины возникновения отрицательной дифференциальной проводимости квазибаллистического GaAs полевого транзистора с эффективной длиной V-образного затвора 30 нм. Отрицательная дифференциальная проводимость возникает за счет пролетных эффектов, а не из-за обратной связи через паразитную емкость затвор-сток. Показано, что возникновение статического домена Ганна при увеличении напряжения на стоке приводит к ликвидации отрицательной дифференциальной проводимости. Экспериментально измеренная мощность генерируемого сигнала на частоте 37 ГГц – 160 мкВт при ширине полосы 20–30 МГц. Теоретически оцененная предельная частота генерации составляет 220 ГГц.

1. Введение

Известно, что длина затвора полевых транзисторов определяет их высокочастотные и усилительные свойства. В [1] было предложено изготавливать полевые транзисторы с V-образным затвором, что существенно уменьшало длину канала транзистора до размеров удвоенной величины обедненной области, создаваемой барьером Шоттки. Обычно уровень легирования канала транзисторов имеет величину порядка 10^{17} см^{-3} , поэтому длина канала не может быть менее 0,3–0,5 мкм, что существенно больше длины свободного пробега электронов в GaAs. Такой транзистор моделировался в [2], а режим, связанный с баллистическим движением носителей заряда, авторами не рассматривался. В [3,4] обсуждалась конструкция, технология изготовления, статические и динамические параметры GaAs квазибаллистического полевого транзистора с V-образным затвором Шоттки (ПТШ) с эффективной длиной 30 нм и уровнем легирования канала $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что обеспечивало длину канала около 100 нм. Было показано, что шумы такого транзистора сопоставимы с шумами транзисторов с двумерным электронным газом, а также возможна генерация высокочастотных колебаний не связанная непосредственно с ганновским доменнообразованием.

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

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследуется транспорт электронов. Рассматриваются причины возникновения отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) у нормально закрытого ПТШ с V-образным затвором улучшенной, по сравнению с [4], конструкции.

2. Эксперимент

На рис. 1 приведена микрофотография поперечного сечения исследуемого транзистора. Транзистор изготовлен на эпитаксиальной n^+nn^- GaAs структуре, n^- буферный слой имеет толщину около 1 мкм и наносится на подложку для уменьшения дефектности проводящего слоя. Ширина структур по третьей координате составляла от 50 до 200 мкм. Металлизация затвора (Au) напылялась термически. Использовался, сформированный методом электронно-лучевого напыления, подслой из титана, стабилизирующий границу раздела металл-полупроводник. Благодаря специальному термическому отжигу барьерного контакта в атмосфере аргона удалось достичь величины пробивного напряжения затвор-сток 5 В. Улучшение конструкции заключалось в подтравливании GaAs под металлизацией затвора в селективном травителе с целью уменьшения паразитных емкостей исток-затвор и затвор-сток.

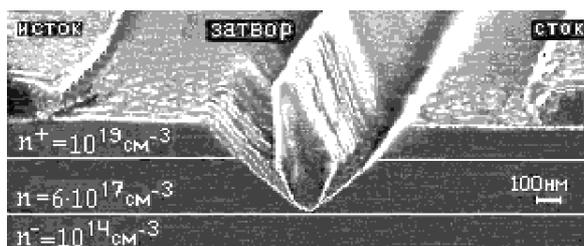


Рис. 1. Микрофотоснимок поперечного сечения полевого транзистора с V-образным затвором, полученный на растровом электронном микроскопе JEOL.

Для области напряжений на затворе и стоке, при которых реализуется ОДП, эффективная длина канала транзистора, сосредоточенного под острием затвора, составляет 100–130 нм. На рис. 2 приведена экспериментально измеренная вольтамперная характеристика (ВАХ) транзистора. Высокочастотная генерация исследовалась по стандартной методике на стенде, в состав которого входили: измеритель вольтамперных характеристик Л2-56, панорамный измеритель Р2-65 и анализатор спектра С4-27. Высокочастотная генерация наблюдалась в диапазоне напряжений на затворе и стоке соответствующем ОДП транзистора. Ширина полосы генерируемого сигнала – около 20 МГц, а мощность достигала значения 160 мкВт и слабо менялась при подтравливании затвора. Последнее объясняется тем, что емкость обратной связи имеет величину порядка 10 фФ, что недостаточно для образования положительной обратной связи, существенно влияющей на процесс генерации в исследуемом интервале частот. Следует отметить, что на более высоких частотах именно емкость обратной связи может привести к нежелательным эффектам, свя-

занным с уменьшением мощности генерируемого сигнала. Поэтому эксперимент, связанный с подтравом, носил двоякую цель: с одной стороны, убедиться в отсутствии обратной связи через емкость; а с другой – получить улучшение характеристик прибора. Последнее подтвердилось 10% уменьшением экспериментально измеренного коэффициента шума транзисторов с подтравленным затвором.

3. Математическая модель

Для моделирования работы транзистора использовалась квазигидродинамическая модель (приближение времен релаксации энергии и импульса) [5, 6], которая хорошо зарекомендовала себя при моделировании полевых транзисторов. Система дифференциальных уравнений включала уравнение Пуассона, непрерывности, баланса энергии и импульса, выражения для плотности тока электронов и потока энергии электронного газа:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{q}{\epsilon_s} (n + N_+), \quad \frac{dm_e(W_n)v_n}{dt} = qE - \frac{m_e(W_n)}{\tau_p} v_n, \quad \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} (\nabla \cdot \mathbf{j}_n), \\ \frac{\partial (W_n n)}{\partial t} &= (\nabla \cdot \mathbf{j}_{Wn}) + (\mathbf{j}_n, \mathbf{E}) - \frac{n(W_n - W_{n0})}{\tau_{Wn}}, \quad \mathbf{j}_n = -qn\mathbf{v}_n + q\nabla(D_n n), \\ \mathbf{j}_{Wn} &= -nW_n\mathbf{v}_n + \nabla(D_n n W_n), \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}_n + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad \mathbf{E} = -\nabla V, \end{aligned} \quad (1)$$

где V – потенциал; n – концентрация электронов; N_+ – концентрации ионов доноров; \mathbf{j}_n – плотность электронного тока, \mathbf{j}_{Wn} – плотность потока энергии электронов, W_n, W_{n0} – неравновесная и равновесная энергия электрона соответственно; τ_{Wn} – время релаксации энергии; τ_p – время релаксации импульса; m_e – эффективная масса электрона; D_n – коэффициент диффузии электронов; μ_n – подвижность электронов; \mathbf{v}_n – скорость электронов; \mathbf{E} – электрическое поле; ϵ_s – диэлектрическая проницаемость.

Путем решения уравнений баланса энергии и импульса в модели учитывались эффекты всплеска и обратного всплеска скорости, а сочетание двумерной и одномерной нестационарных моделей позволяло рассчитывать траектории движения отдельных электронов, влетающих в канал транзистора с различными начальными энергиями. На контактах задавались граничные условия, соответствующие комнатной температуре электронного газа и фиксированному значению потенциала. Поверхностные заряды, адсорбирующиеся на свободной поверхности, в расчет не принимались, так как величина обедненного слоя на поверхности существенно меньше толщины канала. Расчетная сетка в области канала имела шаг в 15 раз мельче, чем в других областях, что позволило в 4 раза сократить время вычислений при сохранении точности расчетов.

Температура канала ПТШ в стационарном состоянии рассчитывалась с помощью уравнения Пуассона в трехмерном приближении. Считалось, что кристалл транзистора расположен на теплоотводе, имеющем комнатную температуру. Источник тепла расположен на торце кристалла, противоположном теплоотводу, а ос-

тальные грани кристалла окружены воздухом, и их тепловыми потерями пренебрегали.

Для решения задачи использовался модифицированный метод верхней релаксации. Суть модификации заключалась в дополнительном градиентном методе поиска решения, ускоряющем процесс схождения. Распределение температуры в каждой ячейке расчетной сетки $T_{ijk}^{n,m}$, найденное после N итераций метода верхней релаксации, пересчитывалось в модифицированное распределение по формуле

$$T_{i,j,k}^{n,m+1} = T_{i,j,k}^{n,m} + \lambda \cdot (T_{i,j,k}^{n,m} - T_{i,j,k}^{n-1,m}), \quad (2)$$

где i, j, k – индексы, обозначающие ячейку; n – номер итерации метода верхней релаксации; m – номер итерации градиентного метода. После пересчета вновь производилось N итераций метода верхней релаксации, а затем новый пересчет по формуле (2) и т.д. Коэффициент λ определяется экспериментально, а количество итераций N составляет 3–10% от полного числа итераций, требуемых для нахождения решения.

Для расчета температуры в канале транзистора в трехмерном случае обычно используется сетка с числом узлов порядка 10^5 – 10^6 , а размер ячеек сетки имеет величину на порядок меньше размера рабочей области прибора. Скорость сходимости метода верхней релаксации существенно зависит от размера ячейки сетки, но даже в случае использования сетки с переменным размером ячеек, для нахождения распределения температуры в канале ПТШ требуется 10^3 – 10^4 итераций. Время расчета распределения температуры для определенного значения напряжений затвора и стока определялось требуемой точностью результата и составляло от единиц до десятков минут на современном персональном компьютере. Вычислительные эксперименты показали, что при использовании модифицированного метода скорость сходимости увеличивается в 2,5–3 раза, а время поиска решения уменьшается в 2,3–2,7 раза.

Теоретически рассчитанная ВАХ приведена на рис.2. Соответствие теории и эксперимента – 30%. Для области напряжений на затворе и стоке, где реализуется ОДП, температура канала составляла 30–50°C. Для области больших напряжений и токов стока температура канала составляла 70–100°C, поэтому учет разогрева канала приводил к повышению точности расчетов ВАХ на 10–20%.

4. Результаты расчетов и их обсуждение

Для объяснения пролетных эффектов, вызывающих отрицательную дифференциальную проводимость транзистора, удобно разбить поперечное сечение транзистора на отдельные области, отличающиеся величиной напряженности электрического поля, концентрациями электронов и атомов донорной примеси (рис.3). Под контактами истока и стока лежат невозмущенные n^+ области и прилегающие к ним n -области, где концентрация электронов и доноров совпадает, а напряженность электрического поля мала. По сути, эти области можно рассматривать как продолжение металлических контактов, поскольку из-за малых размеров и высокой концентрации электронов их сопротивление на 2–3 порядка меньше, чем сопротивление канала.

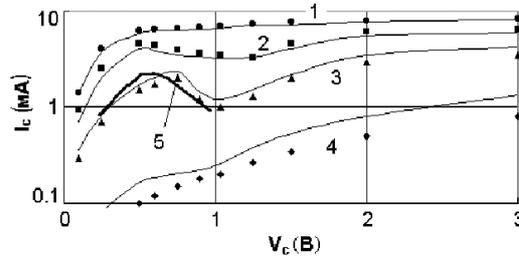


Рис. 2. Зависимость тока стока транзистора от напряжения на стоке при различных напряжениях на затворе: 1 – 0,4 В; 2 – 0,3 В; 3 – 0,2 В; 4 – 0,1 В. Значки – эксперимент, сплошные линии – расчет по квазигидродинамической модели, жирная линия, помеченная цифрой 5 – аналитическая оценка с использованием формулы (3) для напряжения на затворе 0,2 В и толщины проводящего слоя под острием затвора 29 нм.

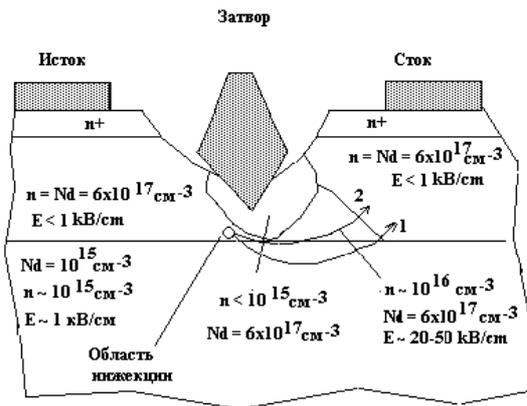


Рис. 3. Схематическое изображение поперечного сечения ПТШ с V-образным затвором.

Левая граница канала образуется областью инжекции, возникающей из-за наличия барьера канал – буферный слой и барьера, образованного встроенным полем затвора. При подаче положительного напряжения на затвор в области, указанной на рис. 3, образуется изгиб дна зоны проводимости, через который в область канала инжектируется ограниченное число электронов. Расчеты показали, что величина барьера в области инжекции составляет 0,03–0,15 В, в зависимости от напряжений затвора и стока (рис. 4–а, б).

Концентрация электронов в левой части канала больше концентрации примеси, а в правой части канала – меньше (рис. 5–а,б), что объясняется процессами инжекции и экстракции носителей в область стока электрическим полем (аналогично прямо и обратно смещенным р-п переходам в биполярном транзисторе).

В [7] показано, что в условиях эффекта всплеска скорости зависимость средней скорости носителей заряда от напряженности электрического поля в структурах длиной около 150 нм имеет максимум ($5 \cdot 10^7$ см/с) при напряженности поля около 30 кВ/см. Уменьшение скорости при больших полях объясняется уменьшением времени свободного пролета электронов, прерываемого рассеянием на оптических фононах и ионах примеси, а при полях более 50 кВ/см – междолинными переходами. При меньших полях междолинные переходы не наблюдаются, так как эффект убегания мал из-за малого времени пролета канала электронами (0,2–0,4 пс). Важно, что электроны, перешедшие в другую долину в области под стоком, не влияют на работу прибора, так как концентрация электронов в канале, из-за наличия барьера в области инжекции, в 30–50 раз меньше, чем в п-областях под истоком и стоком, и даже в случае полей более 50 кВ/см, когда все электроны, двигаясь в канале, претерпевают междолинное рассеяние, п-область, примыкающая к стоку, будет иметь сопротивление существенно меньше сопротивления канала.

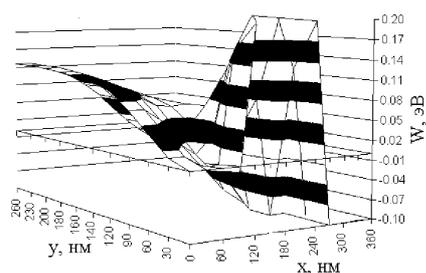


Рис. 4(а). Дно зоны проводимости в области канала транзистора при напряжении на затворе 0,2 В и напряжении на стоке 0,5 В. Координата X соответствует направлению вдоль канала. Координаты области инжекции: 60–120 нм; ОПЗ затвора: 150–270 нм. Координата Y направлена в глубину структуры транзистора.

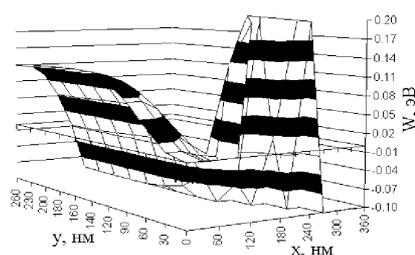


Рис. 4(б). Дно зонной диаграммы в области истока при напряжении на затворе 0,2 В и напряжении на стоке 1,5 В. Координата X соответствует направлению вдоль канала. Координаты области инжекции: 60–120 нм; ОПЗ затвора: 150–270 нм. Координата Y направлена в глубину структуры транзистора.

В традиционных полевых транзисторах явление инжекции электронов в буферный слой рассматривается как паразитное. Оно приводит к снижению крутизны и коэффициента усиления приборов. В рассматриваемом приборе подобные процессы минимизированы по двум взаимодополняющим причинам. Длина канала транзи-

стора порядка нескольких длин свободного пробега, поэтому электроны испытывают в среднем 3–5 столкновений за время пролета канала. Расположение n^+ -слоя стокового контакта таково, что на правой границе канала компонента электрического поля, перпендикулярная границе раздела канал–подложка, больше продольной компоненты. Это приводит вытягиванию носителей заряда из слоя, прилегающего к каналу снизу. Последнее проявляется тем сильнее, чем большее напряжение приложено к стоку. В результате, при малых напряжениях на стоке усредненная траектория движения носителей заряда будет в основном проходить в области с малым уровнем легирования (траектория 1 на рис. 3). При увеличении напряжения на стоке получаем траекторию, обозначенную цифрой 2. Существенная (несколько порядков) разница в концентрации примеси приводит к уменьшению средней скорости движения носителей заряда в канале (рис. 5) в 1,2–1,4 раза, несмотря на упругость столкновений с ионами примеси, что объясняется увеличением среднего угла рассеяния. Уменьшение средней скорости ведет к уменьшению тока стока транзистора и появлению на ВАХ участка с отрицательной дифференциальной проводимостью. Междолинные переходы в этом случае отсутствуют, так как время пролета канала составляет около 0,1–0,4 пс, и средняя энергия электронов около стокового края канала увеличивается лишь до значений 0,18–0,22 эВ.

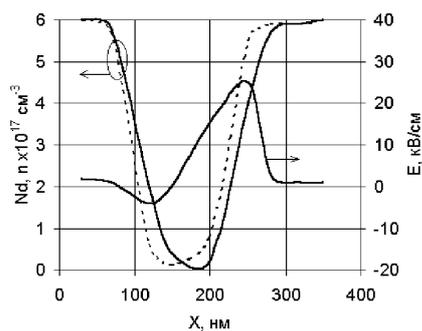


Рис. 5(а). Распределение концентрации доноров, электронов и напряженности электрического поля вдоль канала при напряжении на затворе 0,2 В и на стоке 0,5 В. Начало координат соответствует области инжекции.

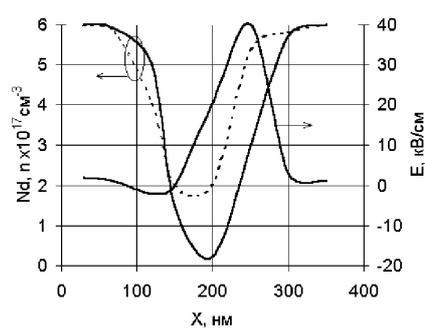


Рис. 5(б). Распределение концентрации доноров, электронов и напряженности электрического поля вдоль канала при напряжении на затворе 0,2 В и на стоке 1,5 В. Начало координат соответствует области инжекции.

При увеличении напряжения на стоке, когда напряженность поля в канале составляет величину 40–60 кВ/см, отдельные электроны в канале начинают претерпевать междолинные переходы. При токах транзистора порядка 1 мА и среднем времени пролета канала 0,1 пс в канале транзистора находится порядка 10^3 электронов, а среднее расстояние между ними при ширине затвора 100 мкм составляет около

100 нм и превышает длину дебаевского экранирования. Таким образом, электроны, находящиеся в L-долине, движутся к стоку, не взаимодействуя друг с другом, т.е. не образуя единого статического домена. Средняя скорость электронов в канале уменьшается до значения около $3 \cdot 10^7$ см/с и обуславливает дальнейшее уменьшение тока стока с увеличением напряжения на стоке. Величина и форма барьера в области инжекции остаются практически неизменными, поэтому концентрация инжектируемых в канал электронов постоянна, а изменения тока обусловлены только изменениями скорости движения носителей заряда.

После инжекции в канал быстрее набирают энергию электроны, имеющие меньшую начальную энергию. Поэтому распределение электронов в области канала, прилегающей к стоку, становится инверсным. Это обусловлено тем, что в области инжекции электроны распределены по энергии согласно максвелловской функции распределения с "обрезанной" барьером нижней частью.

При еще больших потенциалах стока напряженность поля в канале увеличивается до значений порядка 60–80 кВ/см, что приводит к росту средней энергии электронов до значений 0,3–0,4 эВ и обуславливает междолинные переходы. В результате, в области канала, прилегающей к стоку, возникает статический ганновский домен. Его возникновение приводит к перестройке распределений электронов и потенциала вдоль канала транзистора, в результате чего при увеличении напряжения на стоке граница домена сдвигается по направлению к истоку. Барьер в области инжекции уменьшается на 20–40%, что увеличивает концентрацию носителей заряда в канале. Несмотря на относительно невысокую скорость электронов в домене, концентрация их возрастает до $2\text{--}4 \cdot 10^{17}$ см⁻³, что обуславливает уменьшение сопротивления домена и всего транзистора в целом. Последнее вызывает рост тока стока при увеличении напряжения на стоке. Когда напряжения достигают значений, при которых электроны после инжекции в канал переходят в верхнюю долину после первого столкновения (поле в канале 80–100 кВ/см), то домен стабилизируется, а барьер в области инжекции пропадает. Последнее приводит к насыщению ВАХ.

Результаты расчета по двумерной квазигидродинамической модели удобно проиллюстрировать с помощью приближенной аналитической оценки. Для полей более 1 кВ/см зависимость средней скорости в канале от электрического поля может быть описана с помощью аппроксимации Крамера, использованной в [2], но с модифицированным коэффициентом E_0 :

$$v(E) = \frac{\mu E + v_s (E/E_0)^4}{1 + (E/E_0)^4}, \quad (3)$$

где $E_0 = 40$ кВ/см вместо традиционных 4 кВ/см, $\mu = 3500$ см²/В·с, а $v_s = 10^7$ см/с. Тогда плотность тока носителей заряда равная $j = env(E)$ имеет максимум для полей около 40 кВ/см, что соответствует напряжению на стоке 0,5 В при длине канала 120 нм и весьма близко к экспериментальному значению (рис. 2).

Оценить напряжение, при котором падение тока стока сменяется ростом, можно исходя из формулы (3). При напряженности поля порядка 100 кВ/см средняя скорость носителей заряда в канале падает до стационарного значения 10^7 см/с, т.е. междолинное рассеяние электронов играет доминирующую роль. Следовательно,

напряжение, соответствующее этому полю, и будет являться искомым. Для длины канала около 120 нм оно составит 1,2 В, что согласуется с экспериментом.

Смещение экстремальных значений напряжений стока для ветвей ВАХ соответствующих разным напряжениям на затворе объясняется различиями в эффективной длине канала, что сказывается на экстремальном поле E_0 в формуле (3). При больших положительных смещениях на затворе концентрация электронов в канале велика, что приводит к увеличению тока инжекции и ликвидации области ОДП, которая в случае нормально открытых транзисторов вообще отсутствует [2]. Для больших отрицательных напряжений, когда транзистор закрыт, ток прибора определяется током утечки через буферный слой, а баллистические эффекты отсутствуют из-за существенного увеличения длины канала при проникновении области пространственного заряда в нелегированный буферный слой.

При больших напряжениях на стоке (2–3 В) форма дна зоны проводимости в области инжекции имеет клиновидную форму, причем ее ширина на 15–20% меньше, а глубина в 2 раза больше (барьер отсутствует), чем при малых напряжениях. Такая форма области инжекции обуславливает вброс электронов в канал под малыми углами к границе раздела канал – буферный слой, что обуславливает уменьшение дисперсии времен пролета электронов вдоль канала, т.е. уменьшает флуктуации тока стока. Именно наличие определенной диаграммы направленности инжектора объясняет рекордно малые для ПТШ (т.е. транзистора без двумерного электронного газа) значения коэффициента шума.

Отметим, что время баллистического пролета электрона под затвором имеет величину порядка 0,1–0,4 пс. Междолинные переходы осуществляются в области, прилегающей к стоку и имеющей размеры для напряжений затвора и стока, соответствующих области ОДП на ВАХ, менее 50 нм. Поэтому время пролета электрона через весь канал составляет менее 1 пс, а теоретически рассчитанная предельная частота генерации имеет величину 220 ГГц.

5. Выводы

Таким образом, отрицательная дифференциальная проводимость полевого транзистора с 30 нм V-образным затвором Шоттки объясняется изменением траектории движения носителей заряда при увеличении напряжения на стоке так, что она начинает проходить по сильнолегированной области, что существенно увеличивает рассеяние носителей заряда. Дополнительным фактором, приводящим к увеличению ОДП, является наличие междолинных переходов, не приводящих к образованию статического домена Ганна. Появление статического домена при увеличении напряжения на стоке приводит к ликвидации участка отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ, а при больших напряжениях на стоке – к ее насыщению.

Литература

- [1] Kohn E. V-shaped-gate GaAs MESFET for improved high frequency performance // *Electronics Letters*, 1975, V.11, № 8, p.160.
- [2] Y.J.Wang, S.S.Lu. Two-dimensional simulation for the GaAs V-groove gate MESFET's // *Solid State Electronics*, 1999, V.43, № 2, p.229.
- [3] Оболенский С.В., Китаев М.А. Полевой транзистор с 30-нм затвором // *Письма в ЖТФ*, 2000, Т.26, вып. 10, с.13.
- [4] Оболенский С.В., Китаев М.А. Исследование процессов генерации в баллистическом полевом транзисторе // *Микроэлектроника*, 2001, Т.30, вып.1, с.7–12.
- [5] M.S.Shur. Influence of non-uniform field distribution on frequency limits of GaAs field-effect transistor // *Electron Lett.*, 1976, V.12, №23, p.615.
- [6] N.V.Demarina, S.V. Obolensky. Modelling of ionizing irradiation influence on Schottky-Gate field-effect transistor // *Microelectronics Reliability*, 1999, V. 39, № 8, p.1247.
- [7] B.Carnez, A.Cappy, A.Kaszinski et al. Modeling of submicron gate field-effect transistors including effects of nonstationary electron dynamics // *J. Appl. Phys.*, 1980, V.51, № 4, p.784.

**Investigation of the negative differential conductivity
of the quasi-ballistic MESFET ^{†)}**

S.V.Obolensky *

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

M.A.Kitaev

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

V.K.Kiselev

*Research and Development Institute of Measuring Systems (NIIS),
Nizhni Novgorod 603600, Russia*

The ballistic MESFET was simulated by the quasi-hydrodynamic two-dimensional device simulator, and was investigated experimentally. The gate length of the MESFET was equal to 30 nm. We have obtained the differential negative conductivity and oscillations on 37 GHz (160 micro-Watt). We have identified the differential negative conductivity as transit-time effect but not the stray feedback.

^{†)} Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 1st Workshop. Nizhni Novgorod, 2001

* Phone: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.runnet.ru