

УДК 621.382.323

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ БАРЬЕРНОГО СЛОЯ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР И ЁМКОСТИ ЗАТВОР—СТОК НА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ И ШУМОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА AlGaIn/GaN

*С. В. Михайлович**, *Ю. В. Фёдоров*

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, г. Москва, Россия

В работе проведено расчётно-аналитическое исследование влияния толщины барьерного слоя наногетероструктуры, а также ёмкости между затвором и стоком C_{gd} на сверхвысокочастотные (предельную частоту усиления по току и максимальную частоту генерации) и шумовые (коэффициент шума) параметры полевого транзистора с высокой подвижностью электронов на AlGaIn/GaN. Продемонстрированы результаты комплексных измерений параметров таких транзисторов в диапазоне 0,1–67 ГГц, изготовленных на наногетероструктурах с толщиной барьерного слоя 3,5–15,7 нм в рамках четырёх технологических маршрутов. Показано, что для уменьшения коэффициента шума и улучшения сверхвысокочастотных характеристик необходимо оптимизировать как параметры наногетероструктур, так и технологию их изготовления. В частности, необходимо уменьшать толщину барьерного слоя и подбирать длину затвора такой, чтобы произведение квадрата максимальной частоты усиления по току внутренней части транзистора на выходное сопротивление между стоком и истоком было максимальным. Помимо этого необходимо уделять внимание форме затворов для уменьшения ёмкости C_{gd} . При определённых условиях изготовления нитридных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов можно добиться более низкого коэффициента шума, чем у транзисторов на арсенидных наногетероструктурах.

ВВЕДЕНИЕ

Преимущества применения полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistor, HEMT) на наногетероструктурах AlGaIn/GaN в мощных передающих сверхвысокочастотных (СВЧ) устройствах радиолокационных и телекоммуникационных систем в настоящее время не вызывают сомнений [1]. Однако влияние параметров наногетероструктур и технологии их изготовления на их шумовые свойства ещё мало изучено, особенно на частотах выше 30 ГГц.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Общепринятые подходы к изучению шумовых характеристик полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов главным образом основаны на линейных эквивалентных схемах с введёнными источниками шума. В работе [2] в качестве источников шума используются два коррелирующих источника, определяемые тремя частотно-независимыми безразмерными параметрами. Для описания шумовых характеристик транзистора необходимо знать его эквивалентную схему и эти три параметра. Несмотря на то, что такой подход позволяет хорошо описать частотное поведение шума, три параметра очень сложно связать с параметрами гетероструктуры AlGaIn/GaN. Также довольно часто используется полуэмпирический подход [3]. Однако в соответствующей формуле для минимального коэффициента шума присутствует подгоночный параметр, не имеющий физического смысла, что также затрудняет выявление связи с парамет-

* sergey_iuhfse@mail.ru

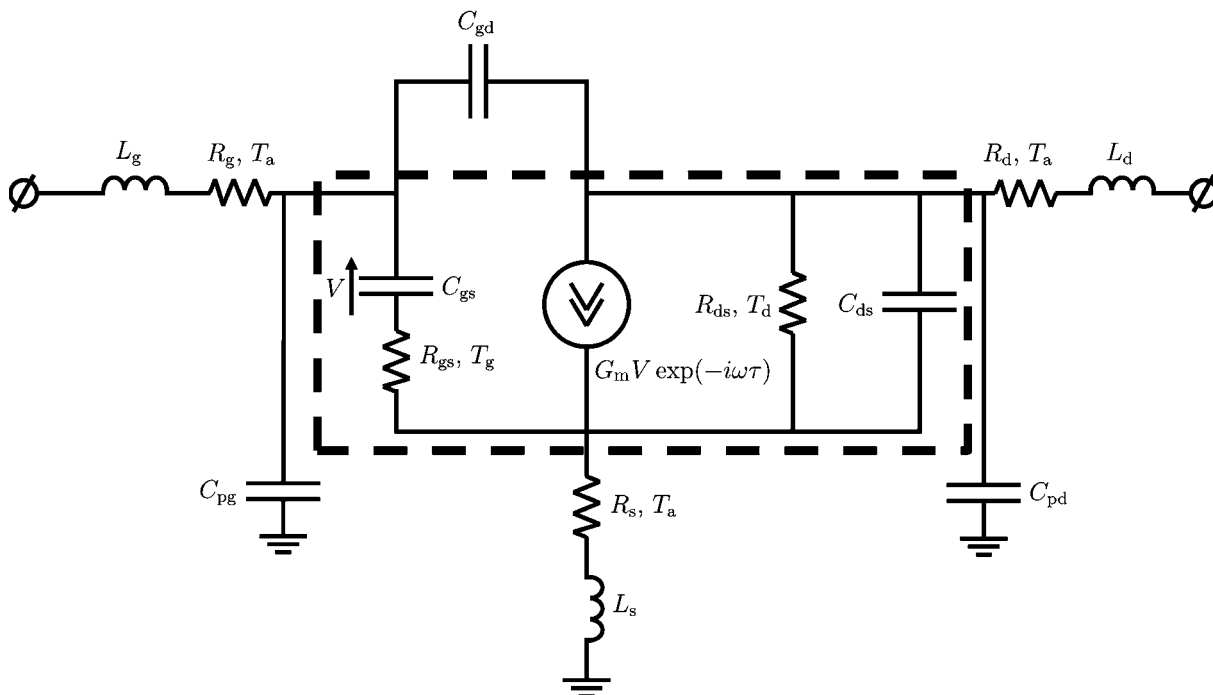


Рис. 1. Малосигнальная эквивалентная схема полевого транзистора с высокой подвижностью электронов в рамках модели [4]. Здесь G_m — внутренняя крутизна вольт-амперной характеристики, C_{gs} , C_{gd} , C_{ds} — ёмкости затвор–исток, затвор–сток и сток–исток, R_{gs} — сопротивление обеднённой области канала, R_{ds} — выходное сопротивление между стоком и истоком, R_s , R_d , R_g — сопротивления стока, истока и сопротивление металла затвора, C_{pg} , C_{pd} — ёмкости металлических площадок транзистора со стороны затвора и стока, T_g , T_d — эквивалентные шумовые температуры резисторов R_{gs} и R_{ds} соответственно, T_a — эквивалентная шумовая температура резисторов R_s , R_d и R_g . Штриховой линией обведена внутренняя часть транзистора

рами гетероструктуры. И, наконец, в работе [4] описывается метод, в котором для определения шумовых характеристик полевого транзистора необходимо знать его эквивалентную схему (рис. 1) и две частотно-независимые постоянные (эквивалентные температуры T_g и T_d внутренних резисторов R_{gs} и R_{ds} соответственно). Шумовая температура T_g примерно соответствует температуре устройства, в то время как температура T_d имеет величину нескольких тысяч кельвинов и связана с источником шума в канале гетероструктуры. Данная модель является наиболее подходящей для определения влияния параметров гетероструктур AlGaIn/GaN на шумовые свойства полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов.

В соответствии с общей теорией шума в представлении четырёхполюсника [5] минимальный коэффициент шума описывается формулой

$$F_{\min} = 1 + 2 \left[R_n G_{\text{cor}} + \sqrt{R_n G_n + (R_n G_{\text{cor}})^2} \right], \tag{1}$$

где R_n — эквивалентное шумовое сопротивление, G_n — эквивалентная шумовая проводимость, G_{cor} — действительная часть комплексной корреляционной проводимости. Коэффициент шума в логарифмическом масштабе определяется как $NF_{\min}[\text{дБ}] = 10 \lg_{10} F_{\min}$.

Выразив (1) через безразмерные параметры $X = R_n G_{\text{cor}}$ и $\gamma = G_n / G_{\text{cor}}$, получим

$$F_{\min} = 1 + 2 \left(X + \sqrt{X \gamma + X^2} \right). \tag{2}$$

В соответствии с теорией из работы [4] эти параметры выражаются как

$$X = \left(\frac{\omega C_{gs}}{G_m} \right)^2 \frac{R_{gs} T_d}{R_{ds} T_0} = \left(\frac{f}{f_C} \right)^2 \frac{R_{gs} T_d}{R_{ds} T_0}, \quad \gamma = \frac{T_g}{T_0} \approx 1, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$, f — рабочая частота устройства, $f_C = G_m / (2\pi C_{gs})$ — максимальная частота усиления по току внутренней части полевого транзистора, G_m — внутренняя крутизна вольт-амперной характеристики, C_{gs} — ёмкость затвор—исток, R_{gs} — сопротивление обеднённой области канала, R_{ds} — выходное сопротивление между стоком и истоком, T_g и T_d — температуры электронного газа в электрических полях, перпендикулярном и параллельном каналу транзистора соответственно, $T_0 = 290$ К — эталонная температура.

Далее для выявления зависимости величины NF_{\min} от конструкции гетероструктуры нами была использована работа [6], в которой авторы на основе обработки многочисленных экспериментальных результатов для полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaIn/GaN установили эмпирическую зависимость между частотой отсечки транзистора f_T по току, длиной затвора L_G и толщиной барьера гетероструктуры t_{bar} в виде

$$f_T [\text{ГГц}] = \frac{19,8}{L_G [\text{мкм}] + 5,1 t_{bar} [\text{мкм}]} . \quad (4)$$

Там же была установлена экспериментальная зависимость сопротивления сток—исток R_{ds} от аспектного отношения L_G/t_{bar} , которая нами была аппроксимирована выражением

$$R_{ds} [\text{Ом}] = 65 \cdot 10^{0,065 L_G/t_{bar}} . \quad (5)$$

Подстановкой (4) и (5) в (3) и (2) нами была выявлена и проанализирована связь коэффициента шума NF_{\min} внутренней части транзистора с толщиной барьера гетероструктуры и аспектным отношением L_G/t_{bar} на частоте 35 ГГц. Оказалось, что уменьшение толщины барьера приводит к снижению NF_{\min} , однако зависимость последнего от аспектного отношения L_G/t_{bar} носит немотонный характер, т. е. наблюдается пологий максимум в области $L_G/t_{bar} = 8 \div 10$ для всех значений t_{bar} (рис. 2). Этот максимум, по-видимому, обусловлен конкуренцией двух параметров, f_C и R_{ds} , поскольку они входят в знаменатель формулы (3) в виде произведения $f_C^2 R_{ds}$, а при увеличении аспектного отношения L_G/t_{bar} частота отсечки f_C уменьшается, в то время как сопротивление R_{ds} растёт.

Зависимость величины NF_{\min} для внутреннего транзистора от толщины барьера показана на рис. 3. Видно, что расчётные величины NF_{\min} лежат на кривой, определяемой выражением (2), в соответствующих областях, причём меньшим величинам t_{bar} однозначно соответствуют меньшие величины NF_{\min} .

Таким образом, на основании обработки эмпирических данных работы [6] нами было установлено, что уменьшение толщины барьера должно приводить к снижению коэффициента шума NF_{\min} внутренней части полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов. Это явление кардинально отличает транзисторы на гетероструктурах AlGaIn/GaN от аналогичных приборов на арсенидных структурах и требует детального изучения.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ

Для проверки сделанных выше предположений было проведено комплексное исследование СВЧ параметров (предельной частоты усиления по току, максимальной частоты генерации) полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов с шириной затвора $W_G = 2 \times 50$ мкм.

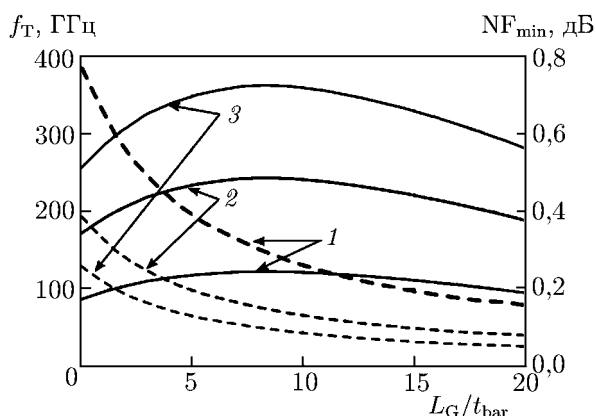


Рис. 2. Зависимости f_T (штриховые линии) и NF_{\min} (сплошные линии) от аспектного отношения L_G/t_{bar} для трёх значений толщины барьерного слоя t_{bar} : 10 нм (1), 20 нм (2) и 30 нм (3)

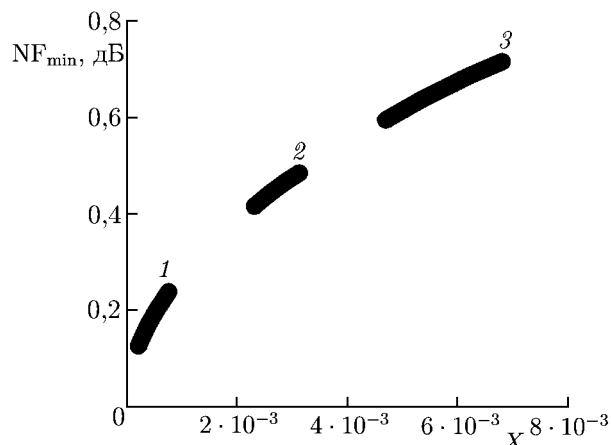


Рис. 3. Расчётная зависимость NF_{\min} от X для толщин барьерного слоя 10 нм (1), 20 нм (2) и 30 нм (3) в диапазоне L_G 0,05÷0,2 мкм

Транзисторы изготавливались согласно нескольким вариантам технологических маршрутов (ТМ) на гетероструктурах с различной толщиной барьерного слоя t_{bar} , выращенных на подложках из Al_2O_3 и SiC .

2.1. Маршрут ТМ-1

По маршруту ТМ-1 изготавливалась пластина типа 1400(5). На подложке из SiC методом металлоорганической гидридной эпитаксии (metal-organic chemical vapor deposition, МОСVD) выращивалась гетероструктура с толщиной барьерного слоя 15,3 нм. Далее проводились формирование мезаизоляции и изготовление «вплавных» омических контактов (полученное удельное сопротивление составляет $0,4 \div 0,6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$). Затем поверхность пассивировалась (покрывалась) слоем Si_3N_4 с толщиной 50 нм методом химического осаждения из газовой фазы в индуктивно-связанной плазме (inductively coupled plasma-chemical vapor deposition, ICP-CVD). После этого проводилось травление подзатворной щели и изготовление методом электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) грибообразного затвора (T-gate) с длиной $0,10 \div 0,12 \text{ мкм}$. Далее осуществлялась общая пассивация путём нанесения слоя Si_3N_4 с толщиной 120 нм методом ICP-CVD.

2.2. Маршрут ТМ-2

По маршруту ТМ-2 изготавливалась пластина типа v-1910-5. На подложке из SiC методом МОСVD выращивалась гетероструктура с толщиной барьерного слоя 15,7 нм. Далее проводились формирование мезаизоляции и изготовление «вплавных» омических контактов (полученное удельное сопротивление составляет $0,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$). После этого методом ЭЛЛ изготовлялся грибообразный затвор с длиной $0,10 \div 0,12 \text{ мкм}$. Далее осуществлялась общая пассивация путём нанесения слоя Si_3N_4 с толщиной 170 нм методом ICP-CVD.

2.3. Маршрут ТМ-3

По маршруту ТМ-3 изготавливались пластины типов v-1911 и 1654(2). На подложках из SiC (тип v-1911) и Al_2O_3 (тип 1654(2)) методом МОСVD выращивались гетероструктуры с толщи-

нами барьерного слоя 13,7 нм (тип v-1911) и 14,7 нм (тип 1654(2)). Далее проводились формирование мезаизоляции и изготовление «несплавленных» (non-alloyed) омических контактов (полученные удельные сопротивления составили $0,26 \div 0,34$ Ом · мм (тип v-1911) и $0,4 \div 0,52$ Ом · мм (тип 1654(2))). После этого методом ЭЛЛ изготавливался грибообразный затвор с длиной $0,10 \div 0,12$ мкм. Далее осуществлялась общая пассивация путём нанесения слоя Si_3N_4 с толщиной 170 нм методом ICP-CVD.

2.4. Маршрут ТМ-4

По маршруту ТМ-4 изготавливались пластины типов 26(4) и 27(3). На подложках из Al_2O_3 методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращивались гетероструктуры с толщинами барьерного слоя 11 нм (тип 26(4)) и 3,5 нм (тип 27(3)). Затем непосредственно в камере роста установки (in-situ) проводилась пассивация диэлектриком Si_3N_4 с толщиной 20 нм. Далее проводились формирование мезаизоляции и изготовление «несплавленных» омических контактов (полученные удельные сопротивления составляют $0,11 \div 0,28$ Ом · мм (тип 26(4)) и $0,11 \div 0,21$ Ом · мм (тип 27(3))). После этого проводились травление подзатворной щели и изготовление методом ЭЛЛ грибообразного затвора с длиной $0,10 \div 0,12$ мкм. Далее осуществлялась общая пассивация путём нанесения слоя Si_3N_4 с толщиной 150 нм методом ICP-CVD.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

После изготовления полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов проводилось комплексное измерение их СВЧ и шумовых параметров. Для анализа полученных данных строились малосигнальные шумовые модели Поспешальского (рис. 1). При построении моделей использовались результаты работы [7] для метаморфных полевых транзисторов на GaAs, с небольшими дополнениями. Номиналы элементов модели подбирались численным симплекс-методом в среде «MicroWave Office». В качестве «мишеней» использовались измеренные S -параметры транзистора, а также частотные зависимости H_{21} максимального номинального коэффициента усиления и коэффициента усиления по Мейсону (Mason's gain) в диапазоне $0,1 \div 67$ ГГц. Для большей привязки алгоритма численной оптимизации к результатам измерений был введён ряд дополнительных условий, в частности на соответствие значений предельной частоты усиления по току f_T и максимальной частоты генерации f_{\max} , определённых из измерений, значениям, вычисленным по формулам (6) и (7) с использованием параметров эквивалентной схемы (рис. 1):

$$f_T = \frac{f_C}{1 + (R_g + R_s)/R_{ds} + C_{gd}/C_{gs}[1 + G_m(R_s + R_d)] + C_{pg}/C_{gs}(1 + G_m R_s)}, \quad (6)$$

$$f_{\max} = \frac{f_T}{\sqrt{(R_g + R_s + R_{gs})/R_{ds} + C_{gd}/C_{gs}[C_{gd}/C_{gs} + G_m(R_s + R_{gs})]}}, \quad (7)$$

где C_{gd} и C_{ds} — ёмкости затвор—сток и сток—исток, R_s , R_d и R_g — сопротивления истока, стока и металла затвора соответственно, C_{pg} — ёмкость металлических площадок транзистора.

Кроме того, для более корректного определения сопротивления R_s было введено ограничение на произведение $G_m R_s < 0,6$, а ёмкость затвор—исток C_{gs} связывалась с длиной L_G , шириной W_G затвора и толщиной барьера t_{bar} формулой плоского конденсатора $C_{gs} = \varepsilon_0 \varepsilon L_G W_G / t_{\text{bar}}$, где ε_0 — электрическая постоянная, ε — диэлектрическая проницаемость среды. Значения L_G подбирались в пределах диапазона размеров вытравленных щелей в диэлектрике на пластине, измеренных с помощью растрового электронного микроскопа, или в пределах теоретически возможной длины

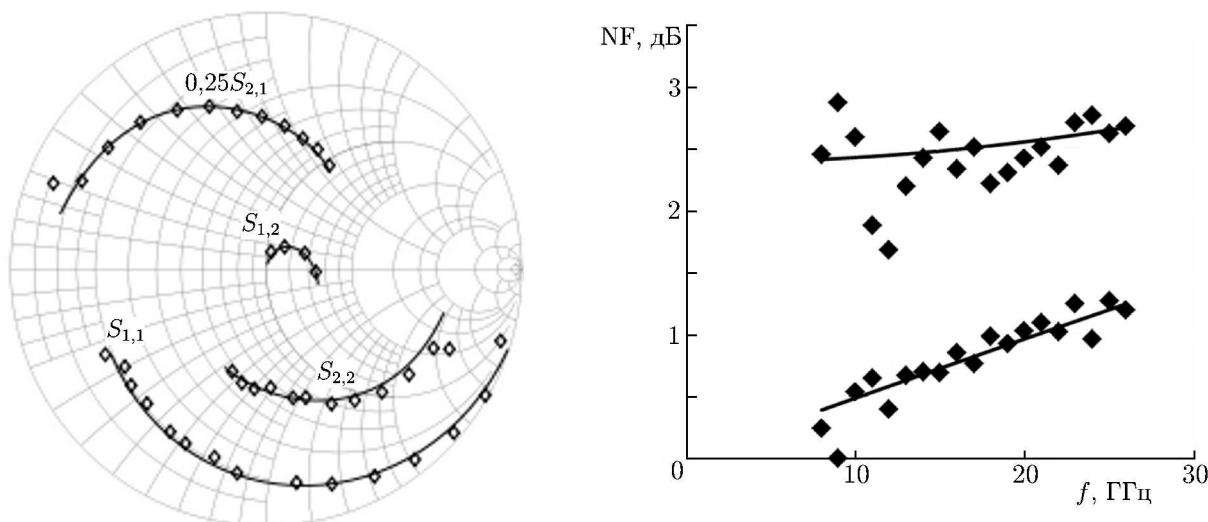


Рис. 4. Расчётные (линии) и измеренные (точки) значения S -параметров (слева) и коэффициента шума NF (справа)

затвора, формируемого методом ЭЛЛ. Значения $t_{\text{бар}}$ выбирались из параметров слоёв наногетероструктур. Данная методика позволяет добиться хорошего соответствия измеренных и расчётных параметров (рис. 4).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения NF_{min} , полученные по описанной выше методике из шумовых моделей транзисторов на частоте 35 ГГц, приведены на рис. 5. Для сравнения показаны два набора точек, для внутренней части транзистора и полного транзистора со всеми источниками теплового шума, генерируемого паразитными сопротивлениями затвора, стока и истока (соответствующий расчёт проводился в «MicroWave Office»). Как можно видеть, в обоих случаях шумовые параметры транзисторов улучшаются при уменьшении X , т. е. возрастании произведения $f_C^2 R_{\text{ds}}$, причём полученная зависимость $NF_{\text{min}}(X)$ имеет универсальный характер для всех исследованных нитридных гетероструктур и технологий изготовления транзисторов. Сплошной линией внизу рис. 5 показана вычисленная по формуле (2) зависимость $NF_{\text{min}}(X)$ для внутренней части транзистора без учёта источников теплового шума, генерируемого паразитными сопротивлениями. Следует отметить, что значения на верхней экстраполирующей кривой для NF_{min} с учётом вклада теплового шума, генерируемого паразитными сопротивлениями, в 7,4 раза больше соответствующих значений на нижней кривой.

Как можно видеть, улучшение шумовых параметров транзисторов с уменьшением толщины барьерного слоя гетероструктур действительно наблюдается, но только для гетероструктур, выращенных методом металлоорганической гидридной эпитаксии в ЗАО «Элма-Малахит». Гетероструктуры с толщинами барьера 11 и 3,5 нм, выращенные методом МЛЭ в НИЦ «Курчатовский институт», проявляют обратную зависимость. Исследование поверхности этих структур атомно-силовым микроскопом показывает наличие микрорельефа, наиболее развитого для самой тонкой гетероструктуры. Этот очень важный факт, по-видимому, имеет прямое отношение к механизму генерации шума в данных гетероструктурах.

Другим немаловажным параметром, влияющим на величину NF_{min} (рис. 6) и отношение f_{max}/f_T (рис. 7), является ёмкость затвор–сток транзистора C_{gd} . Эта ёмкость минимальна для

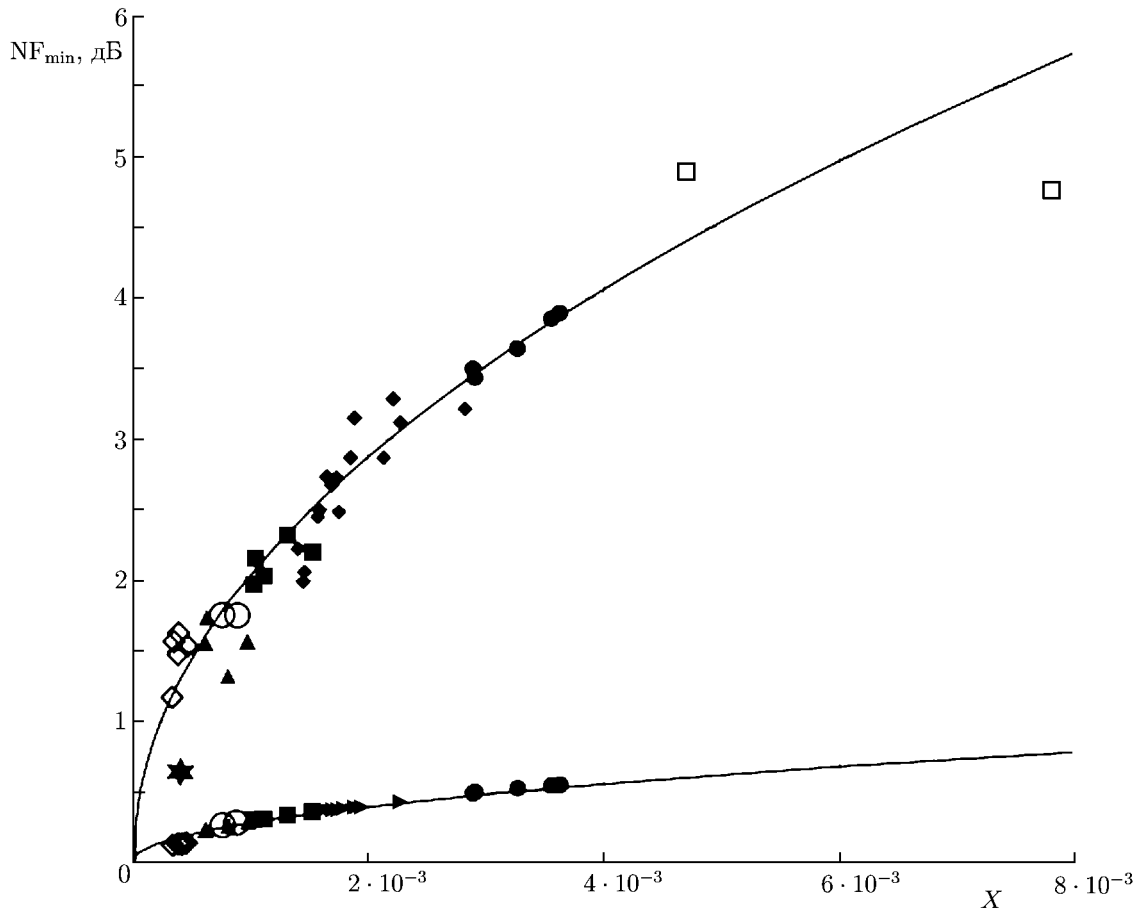


Рис. 5. Зависимость $NF_{\min}(X)$ для GaN (с толщиной барьерного слоя 33 нм, символ \square и 18 нм, \blacklozenge), пластин типа ν -1910-5 (15,7 нм, \circ), 1400(5) (15,3 нм, \blacksquare), 1654(2) (14,7 нм, \blacktriangle), ν -1911-5 (13,7 нм, \diamond), 26(4) (11 нм, \blacktriangleright), 27(3) (3,5 нм, \bullet). Верхние значения отвечают полному транзистору со всеми источниками шума, нижние — внутренней части транзистора. Символ * соответствует результатам работы [8]

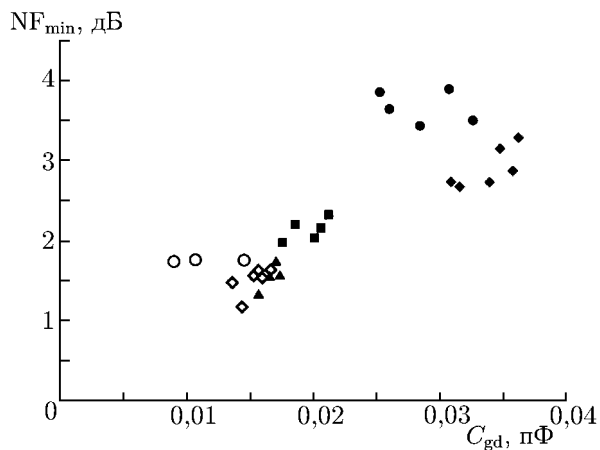


Рис. 6. Зависимость $NF_{\min}(C_{gd})$ для пластин типа 1910-5 (символ \circ), 1400(5) (\blacksquare), 1911-5 (\diamond), 1654(2) (\blacktriangle), 26(4) (\blacklozenge), 27(3) (\bullet)

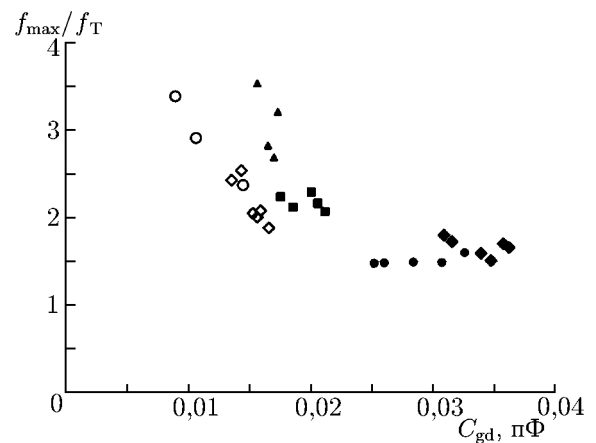


Рис. 7. Зависимость $f_{\max}/f_T(C_{gd})$. Обозначения см. на рис. 6

транзисторов, изготовленных по маршрутам ТМ-2 и ТМ-3 без пассивации поверхности гетеро-

структуры перед изготовлением затворов и, соответственно, без процедуры травления затворной щели в диэлектрике. Отметим, что для транзисторов, изготовленных на пластине типа v-1910-5 с минимальной ёмкостью C_{gd} , сопротивление омических контактов играет существенную роль, поскольку величина NF_{min} , по-видимому, могла быть меньше (рис. 6) в случае меньшего омического сопротивления. Для транзисторов, изготовленных по маршруту ТМ-4, со слоем «тонкого» (20 нм) диэлектрика, величины C_{gd} и NF_{min} максимальны. Это, вероятно, свидетельствует о том, что «избыточность» ёмкости C_{gd} , скорее всего, определяется напылением части металла «ножки» затвора на диэлектрик в результате уширения резиста при плазмохимической обработке или ошибкой позиционирования затворов в предварительно протравленную щель.

ВЫВОДЫ

В проделанной работе показано, что для уменьшения коэффициента шума необходимо минимизировать толщину барьерного слоя наногетероструктур и подобрать длину затвора так, чтобы произведение $f_C^2 R_{ds}$ было максимальным. Также особое внимание следует уделять гладкости поверхности нитридных наногетероструктур с целью уменьшения рассеяния носителей в канале полевого транзистора. Критерием в данном случае может являться увеличение подвижности двумерного электронного газа. Кроме того, особое внимание должно быть уделено оптимизации технологии изготовления затворов и их формы для минимизации ёмкости затвор—сток C_{gd} .

При оптимальных условиях изготовления нитридные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов могут иметь значительно более низкий коэффициент шума, чем транзисторы на арсенидных наногетероструктурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о предоставлении субсидии 14.604.21.0136, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60414X0136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галиев Р. Р., Гнатюк Д. Л., Зуев А. В. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2015. № 2. С. 21.
2. Pucel R. A., Haus H. A., Stutz H. // Adv. Electron. Electron Phys. 1975. V. 38. P. 195.
3. Fukui H. // IEEE Trans. Electron Devices. 1979. V. 26. P. 1032.
4. Pospieszalski M. W. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1989. V. 37. P. 1340.
5. Rothe H., Dahlke W. // Proc. IRE. 1956. V. 44. P. 811.
6. Jessen G. H., Fitch R. C., Gillespie J. K., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2007. V. 54. P. 2589.
7. Михайлович С. В., Фёдоров Ю. В., Бугаев А. С. и др. // Докл. ТУСУРа. Ч. 2. 2011. Т. 24, № 2. С. 31.
8. Shinohara K., Regan D. C., Tang Y., et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. V. 60. P. 2982.

Поступила в редакцию 29 января 2015 г.; принята в печать 13 июля 2015 г.

**INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE BARRIER LAYER
IN NANOHETEROSTRUCTURES AND THE GATE-DRAIN CAPACITANCE
ON THE MICROWAVE AND NOISE PARAMETERS OF FIELD-EFFECT
AlGaN/GaN HEMT**

S. V. Mikhaylovich and Yu. V. Fedorov

We perform a computational and analytical study of how the thickness of the barrier layer in nanoheterostructures and the gate-drain capacitance C_{gd} influence the microwave parameters (limiting frequency of current amplification and maximum generation frequency) and noise parameters (noise ratio) of a field-effect AlGaN/GaN high electron mobility transistor. The results of complex measurements of the parameters of such transistors based on nanoheterostructures with a barrier layer thickness of 3.5–15.7 nm, which were performed in the framework of four technological routes in the range 0.1–67 GHz, are presented. It is shown that in order to reduce the noise ratio and improve the microwave parameters, it is necessary to optimize both the parameters of nanoheterostructures and the manufacturing techniques. In particular, the thickness of the barrier layer should be reduced, and the gate length should be chosen such as to maximize the product of the squared maximum current amplification frequency in the interior of the transistor and the output impedance between the drain and source. Additionally, attention should be given to the shape of the gate, to reduce the capacitance C_{gd} . Under certain conditions of manufacture nitride field-effect HEMT, one can achieve a lower noise ratio compared with the transistors based on arsenide nanoheterostructures.