

Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием

© В.М. Лукашин*, А.Б. Пашковский*, К.С. Журавлев[†], А.И. Торопов⁺,
В.Г. Лапин*, Е.И. Голант*, А.А. Капралова*

* Научно-производственное предприятие „Исток“,
141195 Фрязино, Московская область, Россия

[†] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 16 июля 2013 г. Принята к печати 19 августа 2013 г.)

Представлены первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах на основе арсенида галлия с квантовой ямой и дополнительными потенциальными барьерами на основе слоев с разными типами легирования, оптимизированными для уменьшения поперечного пространственного переноса электронов и увеличения эффекта размерного квантования. Транзисторы продемонстрировали рост выходной мощности в 2 раза при длине трапециевидного затвора 0.4–0.5 мкм и общей ширине затвора транзистора 0.8 мм на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме работы. При этом коэффициент усиления превысил 9.5 дБ при удельной выходной мощности более 1.6 Вт/мм и величине КПД по добавленной мощности до 50%. Проведена оценка перспектив развития данного типа приборов.

Твердотельная сверхвысокочастотная (СВЧ) электронная компонентная база, одним из важнейших элементов которой остаются усилители мощности на полевых транзисторах, активно востребована для разработки и производства систем беспроводной связи, включающей широкий спектр аппаратуры, в том числе для стационарной и мобильной телекоммуникационной аппаратуры, для высокоскоростной оптоволоконной связи, спутникового и кабельного телевидения, в том числе телевидения высокой четкости, устройств радиолокации на основе активных фазированных антенных решеток, радиоастрономии, телеметрии, контрольно-измерительной аппаратуры и многого другого.

В последние годы наблюдается бурный всплеск активности в области разработки мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, особенно на гетероструктурах на основе нитрида галлия [1], и их использования в различных типах усилителей мощности. Стремительное улучшение характеристик таких приборов почти ни у кого не оставляет сомнений в том, что традиционные мощные СВЧ транзисторы типа рНЕМТ (*pseudomorphic high electron mobility transistor*) на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs–InGaAs–GaAs в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. Исключение составляет СВЧ аппаратура, требующая низковольтного (не более 8–9 В) напряжения питания. Однако результаты, которые будут приведены далее, заставляют существенно пересмотреть данное предположение.

Долгие годы мощные СВЧ транзисторы типа рНЕМТ были основным элементом устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов, и поэтому с момента их появления и до сих пор во всем мире активно ведутся

исследования, направленные на улучшение параметров мощных СВЧ транзисторов, таких как выходная мощность, коэффициент усиления и коэффициент полезного действия [2–5].

Выходные характеристики гетероструктурных полевых транзисторов определяются многими факторами: параметрами гетероструктуры, размерной обработкой, топологией, конкретным технологическим маршрутом изготовления и т.д. Однако именно оптимальная конструкция и высокое качество гетероструктуры, определяющие основные электрофизические характеристики структуры рНЕМТ — подвижность μ_e и концентрацию n_s двумерного электронного газа в канале InGaAs, позволяют получить наилучшие характеристики СВЧ приборов. Поэтому, наряду с уменьшением длины затвора и оптимизацией технологии изготовления транзистора, оптимизация конструкции гетероструктуры рНЕМТ и условий выращивания отдельных слоев является актуальной задачей и влечет за собой фундаментальные исследования электронных транспортных свойств [6]. В современных полевых транзисторах рНЕМТ однородный профиль легирования широко заменяется планарным δ -легированием, позволяющим получать большую поверхностную плотность электронов в слое с квазидвумерным электронным газом. Кроме того, для достижения большей проводимости, более широкого динамического диапазона и лучшей линейности транзисторов используется двойное δ -легирование, при котором δ -слои легирующей примеси формируются в процессе роста структуры ниже и выше слоя канала. Введение небольшой (обычно 15–20%) добавки индия в канал увеличивает как подвижность электронов за счет уменьшения их эффективной массы и интенсивности рассеяния, так и их поверхностную плотность за счет увеличения разрыва зон на границах гетероперехода. Хотя такие структуры несколько уступают по величинам подвижности μ_e и поверхностной плотности двумерного

[†] E-mail: zhur@thermo.isp.nsc.ru

электронного газа n_s структурам, полученным на подложках фосфида индия InP, но благодаря отработанной технологии и более низким ценам GaAs-подложек, по сравнению с InP-подложками, в настоящее время они являются наиболее распространенными.

Так как в соответствии с простейшей оценкой [7] выходная мощность транзистора пропорциональна произведению рабочего тока на напряжение, то при разработке гетероструктур для мощных полевых транзисторов обычно стремятся добиться максимального произведения подвижности электронов на их поверхностную плотность. Так как рост поверхностной плотности электронов ведет к росту напряжения перекрытия, и соответственно уменьшению КПД [7], производство подвижности электронов на их поверхностную плотность стремятся увеличивать в основном за счет увеличения подвижности. Попытки оптимизации гетероструктур для мощных полевых транзисторов в этом направлении сталкиваются с большим набором жестких физических и технологических ограничений [6]. Создается впечатление, что за многие годы работ с гетероструктурами на основе арсенида галлия для мощных полевых транзисторов был найден примерный набор оптимальных толщин слоев и концентраций легирующей примеси в них. Различные варианты конструкций типичных серийных транзисторов на основе традиционной псевдоморфной гетероструктуры AlGaAs–InGaAs–GaAs демонстрируют примерно одинаковую удельную выходную мощность на уровне 1 Вт/мм [8,9]. Вероятно, это оказалось одной из важных причин, почему в последние годы максимум научной активности сместился в область исследования широкозонных материалов, позволяющих получать существенно большие величины поверхностной плотности электронов в канале и пробивные напряжения, хотя и при значительном снижении подвижности. Однако более тщательный анализ процессов, определяющих работу транзисторов с затвором субмикронной длины, показывает, что, возможно, псевдоморфные гетероструктуры далеко не исчерпали все свои возможности. Дело в том, что при субмикронных длинах затвора динамика электронов носит очень сложный характер, особенно в многослойных материалах и при наличии размерно-квантовых эффектов в потенциальной яме канала. В частности, ток, текущий через транзистор, определяется не только подвижностью электронов, но и всплеском дрейфовой скорости электронов под затвором. Всплеск дрейфовой скорости зависит как от подвижности электронов, так и от поперечного переноса электронов в гетероструктуре и интенсивности рассеяния электронов в слоях широкозонного материала, особенно при положительных напряжениях на затворе транзистора [10]. В свою очередь, интенсивность переходов из квантовой ямы в широкозонный материал зависит от положения нижнего квантового уровня в яме, разрывов зон на границах гетероперехода, потенциального рельефа дна зоны проводимости в широкозонном материале и т.д. Поэтому представляется возможным, оптимизируя параметры квантовой ямы и ограничивая область движения электронов

дополнительными потенциальными барьерами, добиться того, чтобы как можно меньше горячих электронов находилось в области широкозонного материала, обрамляющего канал из InGaAs, и эта область была бы как можно уже. В этом случае существенно уменьшится рассеяние в широкозонном материале, увеличится всплеск дрейфовой скорости и соответственно увеличится ток, текущий через транзистор, и, как следствие, увеличится его выходная мощность.

1. Результаты эксперимента

Предлагаемый метод на первый взгляд позволяет легко увеличить ток, текущий через транзистор, однако на этом пути существует серьезная технологическая проблема получения достаточно высоких потенциальных барьеров с малой длиной нарастания в направлении роста структуры для локализации горячих электронов в слое канала из InGaAs. Использование гетеробарьеров в эпитаксиальных структурах AlGaAs–InGaAs–GaAs не дает нужного эффекта, так как ширина запрещенной зоны при повышении содержания алюминия увеличивается недостаточно сильно. Кроме того, в слоях $Al_xGa_{1-x}As$ с большим содержанием алюминия ($x > 0.35$) формируются глубокие DX центры, захватывающие электроны, и происходит инверсия долин в зоне проводимости [11], что резко усиливает интенсивность рассеяния горячих электронов, проникающих в широкозонные слои [12].

Выход можно искать в использовании донорно-акцепторного легирования гетероструктур для построения дополнительных потенциальных барьеров, локализуемых горячие электроны в слое канала [13–15]. Об увеличении потенциального барьера между слоем канала гетероструктуры и подложкой за счет объемного легирования буферного слоя акцепторами известно давно [16]. Важно, однако, что при обычном объемном легировании акцепторами потенциальные барьеры обладают сравнительно большой длиной нарастания кроме этого, использование объемного легирования акцепторами приводит к возникновению дополнительного канала рассеяния горячих электронов на акцепторах. В результате использование объемного легирования буферного слоя акцепторами не оказывает положительного влияния на параметры прибора, а изготовление таких структур сталкивается с серьезными технологическими проблемами. Сделать потенциальные барьеры достаточно высокими при малой длине нарастания высоты барьера можно, сформировав выше и ниже канала InGaAs узкие слои, желательны δ -слои, легированные донорами и акцепторами и разделенные нелегированной прослойкой. В зависимости от назначения транзистора эти слои могут быть сформированы в виде структур $p^+ - i - \delta n$ или $\delta p - i - \delta n$ с избыточным легированием донорами. Встроенное электрическое поле в этих структурах способствует переходу электронов из δn -слоя в канал транзистора, что увеличивает проводимость гетероструктуры. Схематическая

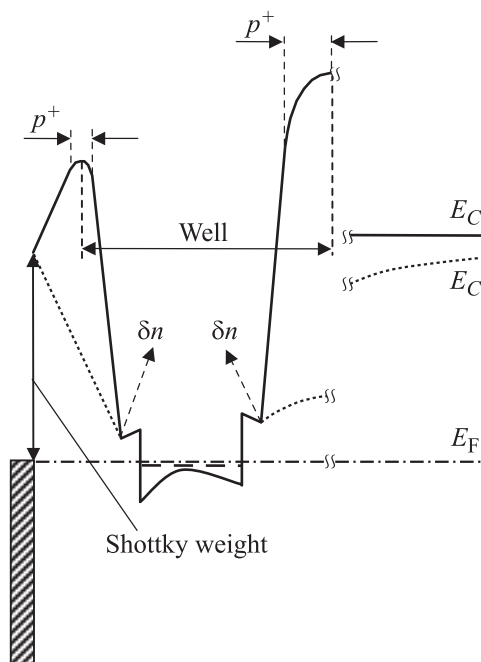


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма разработанной рНЕМТ-структуры. Пунктир — зонная диаграмма обычной рНЕМТ-структуры без легирования акцепторами. Показано расположение слоев с объемным легированием акцепторами и слоев, δ -легированных донорами. Через разрывы продемонстрировано поведение зонных диаграмм и положение уровня Ферми на большом расстоянии от квантовой ямы канала.

зонная диаграмма структуры AlGaAs–InGaAs–GaAs с донорно-акцепторным легированием показана на рис. 1.

В принципе такая гетероструктура может иметь следующие преимущества перед традиционной.

1. Уменьшение рассеяния горячих электронов в широкозонном материале за счет уменьшения толщины слоя широкозонного материала, в котором могут находиться электроны.

2. Увеличение поверхностной плотности электронов в квантовой яме.

3. Уменьшение интенсивности рассеяния горячих электронов за счет усиления эффекта размерного квантования.

4. Уменьшение туннельного тока за счет увеличения толщины потенциального барьера.

5. Уменьшение числа горячих электронов, уходящих в буфер, и улучшение управления током при высоких напряжениях на затворе.

Расчеты показывают, что высота потенциальных барьеров для электронов в канале, формируемых с помощью примесного легирования, может достигать ширины запрещенной зоны широкозонных слоев, при этом потенциальный рельеф в области барьеров изменяется на несколько нанометров, а поверхностная плотность электронов в канале может превышать $5.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Еще одна интересная особенность рассматриваемой структуры состоит в следующем. В структурах без

дополнительных барьеров в квантовой яме обычно находится всего один квантовый уровень, который лежит достаточно близко от края ямы. Выше находится практически непрерывный спектр с расстоянием между уровнями менее 1 мэВ, что заметно меньше средней энергии всех видов фононов. Поэтому горячие электроны с энергией больше глубины квантовой ямы испытывают все виды рассеяния практически как в объемном материале. Квантование спектра в диапазоне малых энергий при этом, на электронном транспорте, по всей вероятности, почти никак не сказывается [17]. Введение дополнительных локализирующих потенциальных барьеров меняет ситуацию, так как при их введении в структуру глубина квантовой ямы значительно увеличивается. Используя достаточно высокие уровни легирования, можно обеспечить длину нарастания локализирующих барьеров меньше толщины слоя канала InGaAs. Как показывает численное решение самосогласованных уравнений Шредингера и Пуассона, в статическом случае (нет тока через транзистор) в квантовой яме с локализирующими потенциальными барьерами оказывается около десятка уровней с расстояниями около 50 мэВ, что превышает энергию оптических фононов в InGaAs ($\omega \approx 35 \text{ мэВ}$). Поэтому можно предположить, что интенсивность рассеяния горячих электронов в такой структуре будет уменьшена из-за особенностей энергетического спектра электронов при сильном размерном квантовании и влиянии запретов, налагаемых законами сохранения импульса и энергии на процессы перехода. Кроме того, в потенциальных барьерах волновая функция даже горячих электронов быстро уменьшается по модулю и большая часть электронов локализована в области узкозонного слоя канала InGaAs.

Таким образом, „эффективная толщина широкозонного“ материала в квантовой яме канала оказывается уменьшенной не только из-за соотношения размеров длин нарастания высоты локализирующих барьеров и толщины слоя канала InGaAs, но и за счет размерно-квантовых эффектов. По этой же причине должно несколько снижаться и рассеяние горячих электронов на донорах в δ -слоях.

Как следует из вышесказанного, гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием могут иметь много преимуществ перед традиционными рНЕМТ структурами. Вполне вероятно, что они могут иметь и недостатки. В частности, один недостаток достаточно очевиден — за возможность построения локализирующих потенциальных барьеров приходится расплачиваться заметным увеличением плотности доноров в структуре, что в принципе может привести к усилению рассеяния горячих электронов на донорах. Этот канал рассеяния электронов частично или полностью подавляется эффектом сильного уменьшения модуля волновой функции в барьерах при условии малости длины нарастания высоты барьеров. По отдельности влияние многих из перечисленных факторов невелико (по оценкам на уровне нескольких процентов), однако они будут взаимодействовать как

Таблица 1.

№ слоя	Слой транзисторной гетероструктуры. Назначение	Состав, x_{AlAs}, y_{InAs}	Толщина	Уровень легирования, N_{Si}
0	Полуизолирующая подложка GaAs	—	400 мкм	SI, (WT)
1	Буферный слой GaAs	—	400 нм	i
2	CP AlGaAs 6 нм/GaAs 5 нм × 12	0.25	—	—
3	Барьерный слой $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	100 нм	i
4	Барьерный слой $p^+-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	15 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
5	Барьерный слой $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	5 нм	i
6	δ -легированный Si— $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	—	$(7.7-8.2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
7	Спейсер $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	3 нм	i
8	Сглаживающий слой $i-GaAs$	—	3 нм	i
9	Канал $In_yGa_{1-y}As$	0.165	14 нм	i
10	Сглаживающий слой $i-GaAs$	—	1.5 нм	i
11	Спейсер $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	3 нм	i
12	δ -легированный Si— $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	—	$(7.0-7.5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
13	Барьерный слой $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	7 нм	i
14	Барьерный слой $p^+-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	8 нм	$5.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
15	Барьерный слой $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.25	6 нм	i
16	Стоп-слой $i-Al_xGa_{1-x}As$	0.86–0.9	3 нм	i
17	Барьерный слой $i-GaAs$	—	27 нм	i
18	Контактный слой n^+-GaAs	—	52 нм	$4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

между собой, так и с другими физическими механизмами. Достаточно точно описать все особенности и тем более, оценить, как весь этот комплекс факторов, особенно с учетом различных взаимосвязей, будет влиять на выходные характеристики прибора, представляется весьма затруднительным.

Ответить на этот вопрос может или достаточно точный расчет, или детальный эксперимент. Точный расчет транзистора с субмикронным затвором на подобной гетероструктуре тоже выглядит крайне проблематичным. Известно, что наиболее точно характеристики приборов с характерными размерами порядка десятых долей микрона рассчитываются методом Монте-Карло [18,19], а различные модификации гидродинамических моделей [19–22], которыми обычно пользуются для расчета транзисторов, при субмикронных длинах затвора и сложных гетероструктурах обычно малоприменимы [10]. Однако, конкретной модификации метода Монте-Карло под данную задачу, насколько нам известно, пока не существует. Более того, пока не ясно, достаточно ли для решения подобных задач решать классическое кинетическое уравнение, а все особенности, связанные с сильным размерным квантованием в глубокой квантовой яме, отнести к интегралу столкновений за счет пересчета вероятностей рассеяния с учетом реальных волновых функций электронов в каждом сечении транзистора, или требуется более точное описание. Кроме того, при изготовлении таких структур будет иметь место ряд технологических проблем, которые могут заметно сказаться на динамике электронов, а вводить в расчет чисто технологические особенности, особенно при решении кинетического уравнения, всегда бывает крайне затруднительно.

Поэтому, для проверки гипотезы о перспективности использования донорно-акцепторного легирования гетероструктур для мощных транзисторов в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии слоев на установке типа Compaq 21 (Рибер, Франция) были выращены экспериментальные гетероструктуры AlGaAs–InGaAs–GaAs, содержащие следующие основные слои, представленные в табл. 1.

Данные структуры в соответствии с измерениями при $T = 300 \text{ К}$ продемонстрировали подвижность электронов $\mu = 5300 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при их поверхностной плотности $n_s = 4.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Далее на данных структурах по методике [23,24] были изготовлены три партии мощных полевых транзисторов со смещенным затвором длиной 0.4–0.5 мкм при общей ширине затвора 0.8 мм·см (рис. 2). Следует отметить, что для первых экспериментов использовался транзистор с обычным трапецевидным, а не T -образным или Γ -образным затвором. Ранее транзисторы, изготавливаемые по данной технологии, на частоте 10 ГГц демонстрировали удельную выходную мощность менее 1 Вт/мм (обычно 0.8–0.9 Вт/мм). Удельную выходную мощность 1 Вт/мм демонстрировали лишь транзисторы с Γ -образным затвором при эффективной длине затвора около 0.15 мкм, однако необходимо учитывать, что сопротивление металлизации Γ -образного затвора в несколько раз ниже, чем у трапецевидного [9].

Все приборы показали достаточно малые токи утечки по подложке и „гладкие“ ВАХ в области отсечки, что свидетельствует о том, что ток горячих электронов в широкозонном материале со стороны подложки мал.

В табл. 2 представлены типичные значения сопротивлений истока, напряжения насыщения на стоке и

Таблица 2.

Транзистор	Сопротивление истока, ом	Напряжение насыщения, В	Пробивное напряжение, В
ДрНЕМТ 4 партии	0.9	1.5	15.5–21
Партия 1	1.5	2	13.5–15
Партия 2	1.5	2.2	14.5–16
Партия 3	2	2.5	16–18

пробивные напряжения как новых транзисторов, так и приборов, изготовленных на обычных структурах (ДрНЕМТ).

Видно, что технология изготовления транзисторов на новых гетероструктурах пока далека от совершенства: первые две партии транзисторов имеют не слишком высокие пробивные напряжения. Сопротивление истока в партиях 1,2 в полтора раза, а в партии 3 — более чем в два раза превышает сопротивление истока в транзисторах на обычных гетероструктурах, изготовленных в СПб АУ НОЦНТ РАН. Соответственно в таких приборах заметно выше и напряжение, при котором происходит насыщение максимального тока стока транзистора. Увеличение сопротивлений связано, по всей видимости, с тем, что наличие акцепторной примеси требует изменения режима формирования омических контактов.

Типичные зависимости тока стока и крутизны от напряжения на затворе в области, где ток насыщения максимален, приведены на рис. 3 для обычной гетероструктуры, а на рис. 4 — для транзистора на гетероструктуре с локализирующими потенциальными барьерами. На этих же рисунках приведены расчетные значения тока стока и „внутренней“ крутизны транзистора пересчитанные на нулевое сопротивление истока.

Видно, что крутизна в новых транзисторах практически симметрична относительно точки максимума, ее величина заметно меньше, а выигрыш по максимальным токам насыщения незначителен: всего 10–15%. Видно также, что для таких транзисторов полученные сопротивления истока недопустимо велики — они радикальным образом меняют вид крутизны, делая ее почти постоянной в широком диапазоне напряжений.

Для СВЧ измерений транзисторы монтировались в 50-омные линии и вставлялись в специальную оправку с согласующими трансформаторами на входе и выходе, с помощью которых проводилась настройка прибора на получение максимальной выходной мощности. При измерениях учитывались потери только в переходах и измерительном тракте, потери в согласующих трансформаторах не учитывались (по оценкам, для транзисторов с шириной затвора более 4 мм они могут составлять до 15%, для транзисторов с меньшей шириной затвора оценки не проводились). Напряжение на стоке приборов варьировалось в диапазоне 8–9 В. По измерению статических характеристик с использованием стандартных

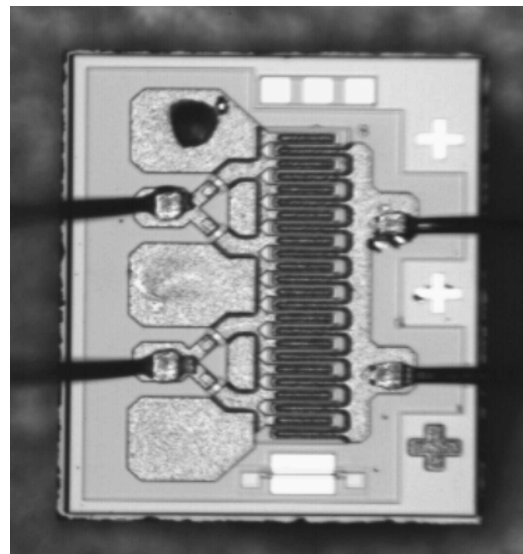


Рис. 2. Фотография исследуемого транзистора.

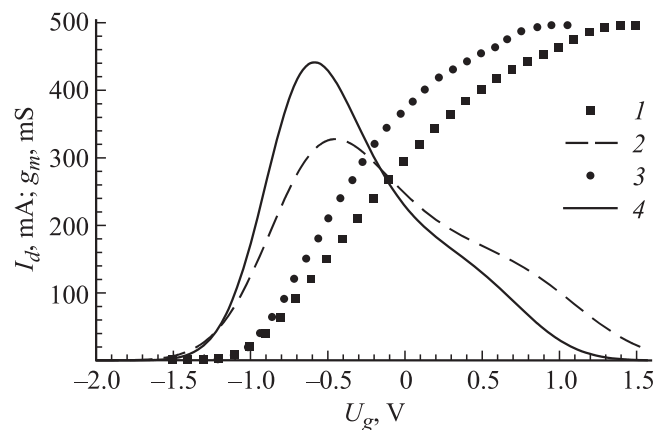


Рис. 3. Ток стока (1) и крутизна (2) ДрНЕМТа на обычной структуре. Ток стока (3) и крутизна (4), пересчитанные на нулевое сопротивление истока.

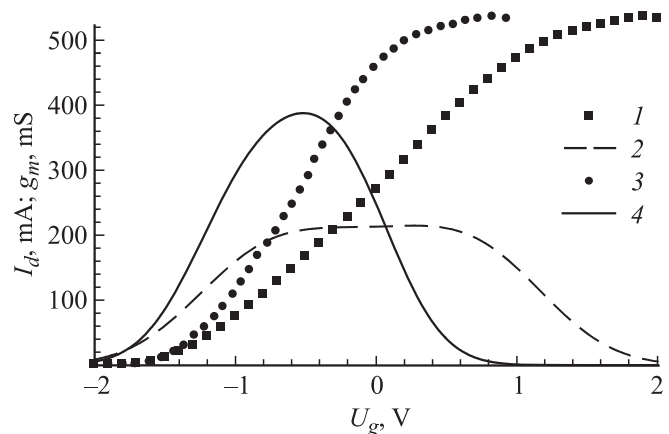


Рис. 4. Ток стока (1) и крутизна (2) ДрНЕМТа на структуре с донорно-акцепторным легированием. Ток стока (3) и крутизна (4), пересчитанные на нулевое сопротивление истока.

Таблица 3.

№	P_{in} , мВт	P_{out} , мВт	K_P , Дб	I , мА	U , В	кпд	P_{out}/W_g , Вт/мм
1	10	135	11.2	160	8		
	150	1040	8.4	220	8	50	1.3
	170	1070	8	230	8	49	1.34
	10	140	11.4	160	9		
	150	1100	8.7	230	9	46	1.38
	170	1140	8.3	240	9	45	1.42
2	10	110	10.4	150	8		
	150	1010	8.3	210	8	51	1.26
	170	1075	8	220	8	51	1.34
	10	100	10	160	9		
	150	1050	8.45	230	9	43	1.31
	170	1150	8.3	240	9	45	1.44
3	170	1090	8.1	240	8	48	1.36
	10	90	9.5	225	9		
	150	1060	8.5	270	9	38	1.33
	170	1140	8.3	270	9	40	1.42

Таблица 4.

№	P_{in} , мВт	P_{out} , мВт	K_P , Дб	I , мА	U , В	кпд	P_{at}/W_g , Вт/мм
1	30	455	11.8	210	9		
	150	1150	8.8	260	8	50	1.44
	150	1280	9.3	270	9	46	1.60
2	30	460	11.8	220	9		
	150	1135	8.8	245	8	50.3	1.42
	150	1300	9.4	255	9	50.1	1.63
3	30	460	11.8	240	9		
	150	1145	8.8	240	8	51.8	1.43
	150	1310	9.4	245	9	52.6	1.64

Таблица 5.

№	P_{in} , мВт	P_{out} , мВт	K_P , Дб	I , мА	U , В	кпд	P_{out}/W_g , Вт/мм
1	30	500	12.2	250	9		
	150	1320	9.4	260	8	56	1.65
	150	1420	9.8	290	9	46	1.78
2	30	490	12.1	230	9		
	150	1300	9.4	260	8	55.2	1.62
	150	1430	9.8	275	9	51.7	1.79
3	30	505	12.2	250	9		
	150	1310	8.9	265	8	54.7	1.63
	150	1450	9.8	285	9	50.7	1.81

оценок можно было ожидать, что выходная мощность экспериментальных транзисторов практически не увеличится по сравнению с традиционными приборами, а коэффициент полезного действия из-за высокого сопротивления истока будет заметно ниже. Однако результаты

эксперимента резко разошлись с оценками. Типичные результаты измерений на частоте 10 ГГц в непрерывном режиме приведены в табл. 3.

Видно, что в партиях 1, 2 транзисторы продемонстрировали в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1.3–1.4 Вт/мм, коэффициент усиления более 8 дБ, КПД около 50% [25,26].

В партии 3 (табл. 4) транзисторы продемонстрировали в непрерывном режиме величину удельной выходной мощности более 1.6 Вт/мм в непрерывном режиме, коэффициент усиления более 9 дБ, КПД около 50%.

В импульсном режиме (длина импульса $\tau = 10$ мкс, скважность $Q = 4$) результаты (табл. 5), полученные на транзисторах из партии 3, выглядят еще более впечатляюще.

2. Обсуждение результатов

Возникает вопрос — а какие собственно из возможных преимуществ новых структур так заметно изменили характеристики приборов? Уменьшение роли паразитных каналов рассеяния, увеличение поверхностной плотности электронов и увеличение роли размерно-квантовых эффектов должны приводить к росту максимального тока, текущего через транзистор, и, как следует из стандартных оценок [7], к пропорциональному росту входной мощности. Результаты же эксперимента оказываются весьма противоречивыми.

Видно (рис. 3, 4), что максимальный ток в транзисторах на новых структурах превосходит ток обычных транзисторов весьма незначительно (на 10, максимум на 20%). Интересно отметить, что грубые оценочные расчеты по модели [10] (в ней достаточно корректно описывается динамика электронов и учет поперечного пространственного переноса, но используется структура с односторонним легированием и треугольная квантовая яма в отличие от соответствующей данной структуре трапециевидной квантовой ямы и не учитывается уменьшение интенсивности рассеяния за счет квантования спектра) дают примерно те же цифры увеличения максимального тока на 10–20%.

Внутренняя крутизна транзисторов на новых структурах практически симметрична относительно точки максимума, а ее максимум соответствует половине максимального тока через транзистор. При этом коэффициент усиления и выходная мощность транзисторов на гетероструктурах с дополнительными потенциальными барьерами почти вдвое выше, чем у обычных при близких пробивных напряжениях.

По отдельности большинство наблюдаемых результатов легко объясняются, однако при попытке объяснения всего комплекса возникают серьезные проблемы.

Изменение формы крутизны вполне объяснимо: сильная асимметрия крутизны как раз и связана с интенсивным поперечным пространственным переносом и паразитными каналами проводимости в широкозонном материале. Введение дополнительных потенциальных

барьеров резко снижает роль поперечного пространственного переноса, что и ведет к исчезновению асимметрии. Этот же эффект мог бы объяснить и наблюдаемый рост тока. При этом влияние размерно-квантовых эффектов представлялось бы незначительным, что само по себе не выглядит очень странным. Однако при этом коэффициент усиления должен вырасти максимум на 20%, а не почти вдвое. Можно предположить, что рост коэффициента усиления связан как раз с усилением размерно-квантовых эффектов и уменьшением интенсивности рассеяния, а незначительный рост тока (всего на 10–20%, а не в 1.5–2 раза) связан с дефектами технологии при изготовлении транзистора. Однако это никоим образом не объясняет почти двукратный рост выходной мощности, которая при данном росте тока тоже должна вырасти максимум на 20%. В принципе возможен еще один эффект. При увеличении положительных напряжений на затворе начинается быстрый рост входной емкости транзистора и, как следствие, резкое падение коэффициента усиления. В режиме большого сигнала вся область положительных напряжений выше этой точки как бы обрезается, и транзистор в этой области не работает. В транзисторах на гетероструктурах с дополнительными барьерами из-за формы потенциального рельефа вблизи затвора этот эффект наблюдается при существенно больших положительных напряжениях на затворе и соответственно больших токах. Это и объясняет столь существенную разницу в выходной мощности. Однако измерение S -параметров рассматриваемых транзисторов и восстановление их эквивалентных схем показывает, что резкий рост входной емкости в обычных транзисторах начинается при токах, всего на 20% меньших, чем в транзисторах с дополнительными потенциальными барьерами, а следовательно, и их выходная мощность должна быть всего на 20%, а не в 2 раза, выше. Возможно, резкий рост мощности связан как раз с симметрией крутизны новых транзисторов и расположением ее максимума в центре ВАХ (при половине максимального тока). Однако это предположение требует дополнительных исследований.

Приведенные выше результаты и оценки, по всей вероятности, все-таки позволяют сделать вывод, что введение дополнительных потенциальных барьеров резко уменьшает роль поперечного переноса электронов и влияние паразитных каналов проводимости в широкозонном материале на характеристики гетероструктурных полевых транзисторов, а интенсивность рассеяния за счет размерно-квантовых эффектов заметно падает. Однако механизм резкого роста выходной мощности прибора остается неясным.

Приведенные экспериментальные результаты являются по сути дела первой попыткой работы с данным типом гетероструктур. Несомненно большой интерес представляет оценка возможных перспектив развития данного типа приборов как на ближайшее будущее (отработка технологии, изготовление транзисторов с современным затвором), так и на более отдаленную

перспективу (совершенствование гетероструктур, поиск новых конструктивных решений).

Элементарные оценки показывают, что улучшение омических контактов для данных гетероструктур позволит в непрерывном режиме:

- 1) сместить оптимальную рабочую точку на ВАХ с 9 на 8 В;
- 2) увеличить удельную выходную мощность до величин более 1.7 Вт/мм;
- 3) увеличить КПД в режиме настройки на максимальную мощность до 55–60%;
- 4) увеличить коэффициент усиления в режиме настройки на максимальную мощность до 10–10.5 дБ.

Необходимо отметить, что исследуемая структура является чисто экспериментальной и была разработана на основе опыта разработки и применения гетероструктур без локализирующих барьеров с типичными толщинами слоев и поверхностными плотностями электронов в канале исключительно для выявления физического эффекта. Поэтому можно предположить, что только оптимизация структуры позволит увеличить уровень удельной мощности до 2 Вт/мм. Как отмечалось выше, эксперименты были проведены на типичном серийно выпускаемом мощном транзисторе с трапециевидным затвором. Можно ожидать, и это, на наш взгляд, крайне пессимистическая оценка, что введение T -образного или Γ -образного затвора длиной менее 0.25 мкм (если не работает какой-нибудь новый, неизвестный пока эффект) дополнительно увеличит мощность, позволит заметно увеличить коэффициент усиления и КПД, а также позволит на частоте 10 ГГц выйти на следующий уровень по параметрам транзисторов:

- 1) удельная мощность более 2.5 Вт/мм;
- 2) коэффициент усиления в насыщении более 13 дБ;
- 3) КПД при настройке на максимальную мощность 55–60%.

С одной стороны, коэффициент усиления 13 дБ для мощного транзистора — избыточный и использование таких приборов может быть затруднено из-за проблем с самовозбуждением. С другой стороны, он может позволить ввести в таких приборах полевой электрод [27] и заметно увеличить их выходную мощность. Ранее в X -диапазоне использование полевого электрода было затруднено из-за резкого уменьшения коэффициента усиления. Однако если приведенные оценки окажутся верны и транзисторы на разрабатываемых структурах будут демонстрировать избыток усиления, то за счет введения полевого электрода при потере усиления можно будет выйти на уровень 5 Вт/мм при коэффициенте усиления 8–9 дБ, т.е. на уровень параметров транзисторов на основе нитрида галлия. Правда, в этом случае остро встанет проблема отвода тепла от активной области прибора, и транзисторы придется делать на подложках толщиной не более 25 мкм или искать новые технические решения, например [28,29].

Еще более перспективным выглядит использование гетероструктур с донорно-акцепторным легированием

в миллиметровом мм диапазоне длин волн. Сейчас лучшие образцы GaN-транзисторов на частоте 40 ГГц демонстрируют малосигнальный коэффициент усиления около 7 дБ при длине затвора 80 нм [30]. Если приведенные выше оценки верны, то на новых структурах этот же коэффициент усиления можно будет получить в насыщении мощности при длине затвора 0.25 мкм.

Не менее перспективным выглядит применение данного технического приема в малощумящих транзисторах. Простая, очень грубая оценка [31] показывает, что при прочих равных условиях коэффициент шума обратно пропорционален коэффициенту усиления

$$F_{\min} \sim 1/K_y,$$

а коэффициент усиления в транзисторах на новых гетероструктурах почти в 2 раза выше, чем на обычных. Однако корректно ответить на этот вопрос может только разработка на практике специальных вариантов конструкции структур с донорно-акцепторным легированием для малощумящих транзисторов и изготовление приборов на их основе.

Как отмечалось выше, одно из возможных достоинств разработанных гетероструктур — это, в частности, уменьшение числа горячих электронов, уходящих в буфер, улучшение управления током при высоких напряжениях на затворе. Данный эффект может иметь важное самостоятельное значение. Введение высокого потенциального барьера для горячих электронов со стороны буфера может решить проблемы управляемости GaN-транзисторов при нанометровых длинах затворов, и возможно, проблемы токов утечки в цифровой технике при переходе к транзисторам с длинами затворов порядка 10 нм.

3. Заключение

Представлены первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах на основе арсенида галлия с оптимизированной квантовой ямой и дополнительными потенциальными барьерами, сформированными с помощью $p^+ - i - \delta n$ -слоев. Транзисторы при длине затвора 0.4–0.5 мкм и общей ширине затвора 0.8 мм на частоте 10 ГГц имеют коэффициент усиления более 9 дБ, удельную выходную мощность более 1.6 Вт/мм, КПД по добавленной мощности до 50%.

Простые оценки показывают, что оптимизация параметров гетероструктуры и использование T -образного или Γ -образного затвора длиной менее 0.25 мкм позволит выйти при частоте входного сигнала 10 ГГц на уровень удельной мощности более 2.5 Вт/мм при коэффициенте усиления более 13 дБ и КПД по добавленной мощности 55–60%, а введение полевого электрода при той же длине затвора позволит достичь величин удельной мощности около 5 Вт/мм при коэффициенте усиления не менее 8 дБ.

Формирование локализуемых потенциальных барьеров методом использования донорно-акцепторного легирования выглядит крайне перспективным для уменьшения токов утечки по буферу, а также улучшения управляемости нитрид-галлиевых полевых транзисторов и уменьшения токов утечки кремниевых полевых транзисторов при нанометровых длинах затворов. Полученные результаты и проведенные оценки позволяют предположить, что если в ближайшее время не произойдет существенное улучшение характеристик транзисторов на основе GaN (например, за счет усиления локализации горячих электронов в слое канала путем использования того же донорно-акцепторного легирования), то они могут существенно утратить свои доминирующие позиции в X -диапазоне и на более высоких частотах, особенно в аппаратуре, требующей малого рабочего напряжения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования науки и России.

Список литературы

- [1] А.А. Кищинский. *Матер. 19-й Междунар. Крымской конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“*. (Севастополь, Вебер, 2009) с. 11.
- [2] А.А. Кальфа, А.С. Тагер. *Электрон. техн., сер. 1, Электроника СВЧ*, **12** (348), 26 (1982).
- [3] C. Gaquiere, J. Grunewald, D. Jambon, E. Dolos, D. Ducatteau, M. Werquin, D. Treron, P. Fellon. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **26** (8), 533 (2005).
- [4] M.V. Baeta Moreira, M.A. Py, M. Gailhanou, M. Pegems. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **10**, 103 (1992).
- [5] C.S. Wu, F. Ren, S.J. Pearton, M. Hu, C.K. Pao, R.F. Wang. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **42**, 1419 (1995).
- [6] И.С. Василевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, С.С. Широков, Р.П. Имамов, И.А. Субботин. *ФТП*, **42**, 1102 (2008).
- [7] L.J. Kushner. *Microwave J.*, **87** (1990).
- [8] TriQuint Semiconductor, *Advance Product Information*, Sept. 19, 2005 Web: www.triquint.com.
- [9] Н.А. Кувшинова, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, К.И. Петров. *Радиотехника*, **11**, 90 (2011).
- [10] А.В. Климова, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский. *ФТП*, **43**, 113 (2009).
- [11] A.K. Saxena. *J. Phys. C*, **13**, 4322 (1980).
- [12] З.С. Грибников, О.Э. Райчев. *ФТП*, **23**, 2171 (1989).
- [13] J. Zou, Z. Abid, H. Dong, A. Gopinath. *Appl. Phys. Lett.* **58**, 2411 (1991).
- [14] J. Zou, H. Dong, A. Gopinath, M.S. Shur. *IEEE Trans. Electron Dev.*, **ED-39**, 250 (1992).
- [15] Патент РФ на полезную модель № 80069 по заявке № 2008133793. Приоритет от 19.08.2008.
- [16] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991) с. 312.
- [17] А.А. Кальфа, А.Б. Пашковский. *ФТП*, **22**, 2090 (1988).
- [18] Н.А. Банов, В.И. Рыжий. *Микроэлектроника*, **15**, 490 (1986).
- [19] В.А. Николаева, В.Д. Пищалко, В.И. Рыжий, Г.Ю. Хренов, Б.Н. Четверушкин. *Микроэлектроника*, **17**, 504 (1988).
- [20] В.Е. Чайка. *Техн. электродинамика*, **3**, 85 (1985).

- [21] Я.Б. Мартынов, А.С. Тагер. Электрон. техн., сер. 1, Электроника СВЧ, **7** (413), 14, (1988).
- [22] Г.З. Гарбер. Радиотехника и электроника, **48**, 125 (2003).
- [23] V.G. Lapin, A.M. Temnov, K.I. Petrov, V.A. Krasnik. GaAs 2000 Conf. proceedings, Oct. 2–3, 2000.
- [24] В.Г. Лапин, В.А. Красник, К.И. Петров, А.М. Темнов. Матер. 11-й Междунар. Крымской конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. (Севастополь, Крым, Украина) p. 135.
- [25] К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, А.Б. Соколов, А.И. Торопов. Электрон. техн., сер. 1, СВЧ-техника, **1** (512), 55 (2012).
- [26] В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов. Письма ЖТФ, **38** (17), 84 (2012).
- [27] Y.-E. Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard, P.M. Chavarkar, T. Wisleder, V.K. Mishra, P. Parikh. IEEE Electron Dev. Lett., **25** (3), 117 (2004).
- [28] Патент РФ № 2463685 по заявке № 2011123071. Приоритет от 07.06.2011.
- [29] А.А. Воробьев, А.В. Галдецкий. Электрон. техн., сер. 1, СВЧ-техника, **3** (510), 37 (2011).
- [30] IEEE Electron Dev. Lett., **33** (9), 1258 (2012).
- [31] И.А. Баранов, А.В. Климова, Л.В. Манченко, О.И. Обрезан, А.Б. Пашковский. Радиотехника, № 3, 34 (2006).

Редактор Т.А. Полянская

Development perspective for power field transistors at with donor-acceptor doped heterostructures

V.M. Lukashin*, A.B. Pashkovskii*, K.S. Zhuravlev⁺,
A.I. Toropov⁺, V.G. Lapin*, E.I. Golant*,
A.A. Kapralova*

* Scientific Manufacture „Istok“,
141195 Fryazino, Moscow District, Russia

⁺ Semiconductor Physics Institute
of Sibiar District of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The first result of power pHEMT's with additional potential barrier and quantum well optimized for real space transferee reduction development have been submitted. High power transistor with gate length about 0.4–0.5 μm and 0.8 mm width demonstrate specific output power higher than 1.6 W/mm, associated gain higher than 9.5 dB and efficiency about 50% at 10 GHz. Prospects of donor-acceptor doped heterostructure application in pHEMT's is done.