

07

Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры

© В.М. Лукашин¹, А.Б. Пашковский¹, В.Г. Лапин¹,
С.В. Щербаков¹, К.С. Журавлев², А.И. Торопов²,
А.А. Капралова¹

¹ НПП „ИСТОК“ им. Шокина, Фрязино, Московская область
E-mail: solidstate10@mail.ru

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск
E-mail: zhur@thermo.isp.nsc.ru.

Поступило в Редакцию 4 сентября 2014 г.

Представлены первые результаты разработки мощных гетероструктурных полевых транзисторов, работающих при нулевом смещении на затворе. Транзисторы при длине Г-образного затвора около $0.3 \mu\text{m}$ с шириной $0.8 \mu\text{m}$ на частоте 10 GHz в импульсном режиме при напряжениях на затворе в диапазоне от $+0.2$ до -0.2 V демонстрируют удельную мощность более 1.6 W/mm при коэффициенте усиления более 11 dB и КПД по добавленной мощности более 40% .

Усилители мощности на основе гетероструктурных полевых транзисторов широко используются в большом числе различных систем, в которых кроме основных (выходная мощность, коэффициент усиления, КПД, полоса рабочих частот) часто предъявляется большой набор совершенно различных дополнительных требований. Например, величина напряжения источников питания строго задана, токи потребления по цепи затвора не должны превышать определенного значения и т.д. В то же время практически все полевые транзисторы на основе традиционных гетероструктур эффективно работают (демонстрируют

максимальные уровни выходной мощности, усиления и КПД) при отрицательных напряжениях на затворе. В ряде изделий это не имеет практически никакого значения. Однако существует ряд систем, например, некоторые виды активных фазированных антенных решеток, для которых эти дополнительные требования могут существенно затруднять разработку цепей питания по затвору и для которых разработка мощных полевых транзисторов, наиболее эффективно работающих при нулевом постоянном смещении на затворе, могла бы быть крайне полезной. Целью данной работы был поиск конструкции гетероструктуры для мощных транзисторов, не требующих подачи смещения на затвор и способных на частоте 10 GHz обеспечить величину удельной выходной СВЧ-мощности более 1 W/mm.

Создать мощный полевой транзистор на *n*-DrHEMT GaAs-гетероструктурах, эффективно работающий при нулевом постоянном смещении на затворе, крайне проблематично. Для того чтобы транзистор отдавал максимальную мощность, рабочая точка (по напряжению на затворе) должна быть выбрана так, чтобы при максимальных положительных смещениях на затворе, вызванных СВЧ-сигналом, ток через транзистор был максимален, а при максимальных отрицательных смещениях на затворе транзистор был полностью перекрыт [1]. Важное дополнительное условие: при максимальном токе в канале транзистора при прямом смещении на затворе поток электронов из канала через затвор должен быть еще мал (иначе мощность начинает резко падать). Электроны в канале транзистора в рабочих режимах разогреваются и приобретают дополнительную энергию не менее величины энергии междолинного зазора (в гетероструктурах на основе GaAs примерно 0.3 eV). Естественно, в том случае, когда величина потенциального барьера на границе металл–полупроводник становится сравнимой с этой величиной, горячие электроны начинают интенсивно уходить в затвор. В то же время высота барьера Шоттки в таких приборах составляет всего около 0.7–1 eV, в то время как напряжение перекрытия типичных транзисторов более 1.5 V даже при малых напряжениях на стоке. При напряжениях на стоке, сравнимых с напряжениями пробоя, напряжение перекрытия обычно увеличивается до величин более 3 V, а для получения максимальной мощности транзистор должен перекрываться именно при высоких напряжениях на стоке. Соотношение величины высоты барьера Шоттки и величины напряжения перекрытия даже с учетом автосмещения и энергии разрыва зон на границах

гетеропереходов приводит к необходимости подачи постоянного отрицательного напряжения на затвор, обеспечивающего оптимальность выбора рабочей точки — выбора такой точки, в которой обеспечивается максимум мощности, выделяемой в нагрузке на выходе транзистора. Кроме этого, подача СВЧ-положительного смещения на затвор приводит к интенсивному поперечному переносу горячих электронов из канала в широкозонный материал и, как следствие, к появлению паразитного канала проводимости и к резкому падению подвижности горячих электронов [2]. Поэтому обычно полевой транзистор имеет оптимальную рабочую точку при постоянном отрицательном напряжении на затворе, с током стока, меньшим половины максимального тока стока, протекающего при максимальной амплитуде СВЧ-положительного смещения на затворе. Управление положением оптимальной рабочей точки можно обеспечить, используя донорно-акцепторное легирование гетероструктур [3,4], позволяющее существенно уменьшить поперечный пространственный перенос и существенно увеличить высоту барьера вблизи границы гетероперехода. По сути дела, $i-p-i-n$ -структура, сформированная между затвором и каналом, является делителем напряжения, подаваемого между затвором и истоком (рис. 1), поэтому, в принципе, оптимальную рабочую точку можно вообще сдвинуть в область постоянных положительных напряжений между затвором и истоком. На рис. 1 показано, что при больших прямых напряжениях на затворе, когда в серийных (n)-DrHEMT барьер Шоттки полностью исчезает, в транзисторах с $i-p-i-n$ -структурой сохраняется потенциальный барьер, препятствующий переносу электронов из канала InGaAs в затвор. Ранее транзисторы, разработанные на структурах с донорно-акцепторным легированием, демонстрировали уникальные для псевдоморфных структур характеристики (двукратный рост удельной мощности и заметное увеличение коэффициента усиления по сравнению с традиционными гетероструктурами на основе GaAs), но оптимальное положение рабочей точки находился при отрицательных напряжениях на затворе [4].

В процессе исследования таких приборов были изготовлены экспериментальные образцы транзисторов (np)-DrHEMT на основе гетероструктур с каналом InGaAs (табл. 1), в которых между затвором и каналом была сформирована $i-p-i-n$ -структура, показавшие достаточную эффективность работы при нулевом смещении на затворе. В экспериментальных образцах транзисторов специально использо-

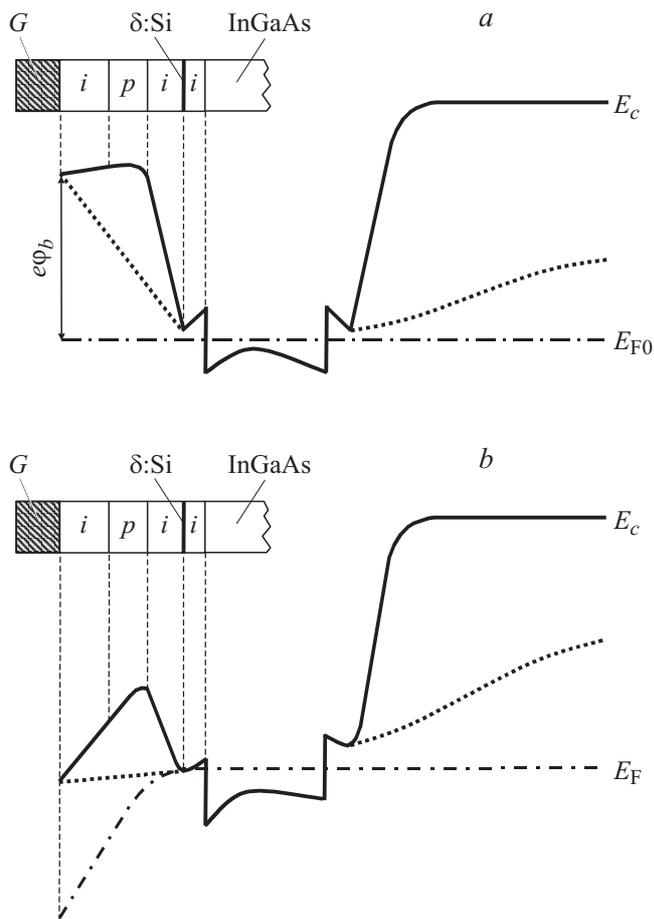


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма разработанной рНЕМТ-структуры. Здесь e — заряд электрона, ϕ_b — потенциал барьера Шоттки, точки — зонная диаграмма обычной (n)-DpHEMT-структуры без легирования акцепторами. a — напряжение на затворе равно 0, b — положительное напряжение на затворе, равное $-\phi_b$. E_{F0} и E_F — соответственно положения равновесного и уровня Ферми электронов, локализованных в квантовой яме канала.

Таблица 1.

№ слоя	Слой структуры. Назначение	Состав	Толщина	Уровни легирования
0	Полуизолирующая подложка GaAs	—	625 μm	SI, (WT)
1	Буферный слой GaAs	—	400 nm	Не легируется
2	CP AlGaAs 6 nm/GaAs 5 nm x 12	—	—	— " —
3	Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	100 nm	— " —
4	Барьерный слой $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	15 nm	$N_A^H = 4.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
5	Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	5 nm	Не легируется
6	Слой $\sigma\text{-Si}$ в матрице	—	—	$8.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
7	Спейсер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	3 nm	Не легируется
8	Сглаживающий слой GaAs	—	3 nm	— " —
9	Канал $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$	0.165	14 nm	— " —
10	Сглаживающий слой GaAs	—	1.5 nm	— " —
11	Спейсер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	3 nm	— " —
12	слой $\delta\text{-Si}$ в матрице	—	—	$7.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
13	Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	7 nm	Не легируется
14	Барьерный слой $p^+-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	8 nm	$N_A^B = 5.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
15	Барьерный слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.25	Варьируется	Не легируется

Таблица 2.

№	P_{in} , mW	P_{out} , mW	K_P , dB	I_d , mA	U_g , V	U_d , V	КПД	P_{out}/W_g , W/mm
1	10	190	12.8	195	-0.3	8	—	—
	100	925	9.7	200	-0.3	8	51.5	1.15
	125	1345	10.3	250	-0.45	12	40.7	1.68
	125	1380	10.4	260	0	12	40.2	1.72
	125	1325	10.3	240	0	11	45	1.66
	125	1160	9.7	220	0	10	47	1.45
	125	1390	10.5	260	0.1	12	40.5	1.73
	125	1380	10.4	260	0.2	12	40.2	1.72
2	30	640	13.3	210	0	12	—	—
	50	905	12.6	210	0	12	40	1.13
	70	1215	12.4	220	0	12	43	1.52
	100	1315	11.2	235	0	12	43	1.64
	125	1345	10.3	240	0	12	42	1.68
	125	1340	10.3	225	-0.3	12	45	1.68
	100	1005	10	180	-0.3	10	50	1.25

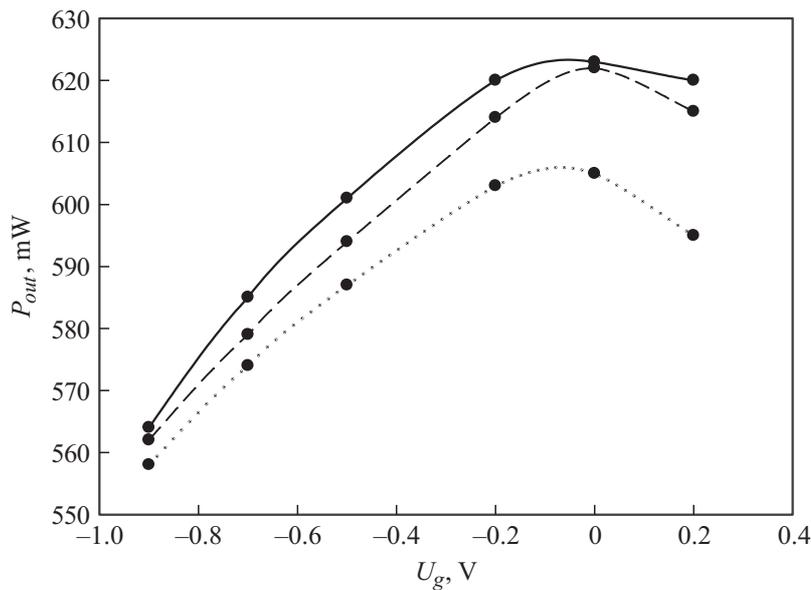


Рис. 2. Зависимость максимальной выходной СВЧ-мощности транзистора от напряжения на затворе.

влась конструкция серийного прибора, выпускаемого в ОАО НПП „Исток“. Это позволило получать характеристики, соответствующие реальным приборам с развитой периферией и соответствующим тепловым сопротивлением. Экспериментальные образцы транзисторов имели ширину затвора $W_g = 0.8 \text{ mm}$ при длине Г-образного затвора [5] около $0.3 \mu\text{m}$ и пробивное напряжение $25\text{--}28 \text{ V}$. В табл. 2 представлены первые типичные результаты измерений характеристик таких приборов. Измерения проводились в импульсном режиме на частоте 10 GHz . Здесь № — номер исследуемого транзистора, P_{in} , P_{out} — входная и выходная мощность соответственно, U_g , U_d — напряжения на затворе и стоке, K_p — коэффициент усиления, I_d — ток стока. Видно, что разработанные приборы показывают высокую удельную СВЧ-мощность, более 1.6 W/mm при коэффициенте усиления более 11 dB и КПД по добавленной мощности более 40% при работе в районе нулевых смещений на затворе и при напряжениях на стоке $11\text{--}12 \text{ V}$.

Стоит отметить несколько интересных особенностей разработанных приборов. В отличие от большинства транзисторов, с ростом входной мощности выходная растет практически линейно, а затем наступает резкое насыщение (разница мощности при 1 и 3 дБ компрессии мала). При удельной мощности более 1.5 W/mm транзистор может иметь коэффициент усиления около 12.5 дБ. Интересно отметить, что при уменьшении напряжения на стоке до 8–10 В и коэффициента усиления до 10 дБ КПД по добавленной мощности возрастает до 50%.

По этой же технологии был изготовлен ряд экспериментальных образцов транзисторов с шириной затвора $W_g = 0.42 \text{ мкм}$. Для трех партий этих транзисторов на рис. 2 приведены зависимости максимальной выходной мощности от напряжения на затворе при напряжении на стоке 12 В при входной мощности СВЧ 60 мВт на частоте 10 GHz. Видно, что и эти образцы транзисторов демонстрируют максимальную выходную СВЧ-мощность практически при нулевых напряжениях на затворе. Таким образом, экспериментально продемонстрирована эффективность применения $i-p-i-n$ -структур, сформированных между затвором и каналом, в качестве делителя напряжения затвора — исток в мощном СВЧ-транзисторе для управления положением оптимальной рабочей точки и возможность эффективной работы мощных гетероструктурных полевых транзисторов при нулевом смещении на затворе.

Список литературы

- [1] Kushner L.J. // Microwave Journal. 1990. V. 87. P 87–102.
- [2] Климова А.В., Лукашин В.М., Пашковский А.Б. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 1. С. 113–118.
- [3] Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
- [4] Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 5. С. 684–692.
- [5] Кувшинова Н.А., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Петров К.И. // Радиотехника. 2011. В. 11. С. 90.