

07

Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рНЕМТ-транзисторах

© А.А. Борисов¹, К.С. Журавлев², С.С. Зырин¹,
В.Г. Лапин¹, В.М. Лукашин¹, А.А. Маковецкая¹,
В.И. Новоселец¹, А.Б. Пашковский¹, А.И. Торопов²,
Н.Д. Урсуляк¹, С.В. Щербаков¹

¹ НПП „ИСТОК“ им. Шокина, Фрязино, Московская область

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН,
Новосибирск

E-mail: solidstate10@mail.ru; zhur@thermo.isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 22 марта 2016 г.

Проведено сравнение малосигнальных характеристик транзисторов на псевдоморфной гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием (DA-рНЕМТ) и транзисторов на традиционной псевдоморфной гетероструктуре (рНЕМТ) без акцепторного легирования. Показано, что DA-рНЕМТ при прочих равных условиях, несмотря на меньшие значения слабополевой подвижности электронов, имеют заметно больший коэффициент усиления, чем обычные рНЕМТ. Эффект обусловлен тем, что в DA-рНЕМТ средняя дрейфовая скорость под затвором заметно (по оценкам в 1.4–1.6 раза) выше. Рост дрейфовой скорости вызван двумя основными, сравнимыми по влиянию причинами: уменьшением роли поперечного пространственного переноса за счет усиления локализации горячих электронов в канале и уменьшением рассеяния горячих электронов из-за сильного размерного квантования в потенциальной яме DA-рНЕМТ-структуры.

Известно, что максимальная частота усиления по току f_t в полевых транзисторах и соответственно их усилительные свойства непосредственно зависят от средней (по длине затвора) дрейфовой скорости электронов под затвором, т.е. $f_t \approx v_D/L_g$. Здесь L_g — эффективная длина затвора с учетом краевых эффектов (длина затвора с обедненными областями у краев затвора), v_D — средняя дрейфовая скорость электронов под затвором [1,2]. Стремясь повысить быстродействие в современных гетероструктурных полевых транзисторах, длину затвора

уменьшают до 25 nm [3], а подвижность и соответственно дрейфовую скорость электронов поднимают за счет увеличения мольной доли индия до 80–100% в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ канале [3–5], что одновременно ведет и к заметному падению пробивного напряжения. Именно поэтому с момента появления первых работ по псевдоморфным гетероструктурным транзисторам с донорно-акцепторным легированием (DA-pHEMT) [6,7] возник принципиальный вопрос, как изменение формы и глубины потенциальной ямы изменяет дрейфовую скорость электронов. Ранее для таких приборов основное внимание уделялось получению максимальной выходной мощности. В этих условиях коэффициент усиления зависит не только от дрейфовой скорости электронов под затвором, но и от многих других факторов (пробивного напряжения, режима работы, особенностей согласования и т. д.). Поэтому можно было только предположить, что дрейфовая скорость электронов заметно растет [8]. Задача данной работы — сделать простые оценки, позволяющие для ряда исследованных приборов по крайней мере оценить этот рост.

Непосредственно измерить по отдельности эффективную длину затвора и среднюю дрейфовую скорость электронов крайне проблематично. Для реальных приборов с развитой периферией и существенным влиянием на выходные характеристики паразитных элементов точно измерить максимальную частоту усиления по току также достаточно сложно. В большинстве случаев эта частота определяется по результатам измерений S -параметров, с последующим расчетом коэффициента усиления. По крайней мере, таким способом можно сделать достаточно точные оценки, особенно если учесть, что при обычных условиях согласования зависимость коэффициента усиления от максимальной частоты усиления по току близка к квадратичной [9]. Для сравнительного анализа малосигнальных характеристик и оценки возможности продвижения в миллиметровый диапазон длин волн исследовались мощные серийные транзисторы [10] с шириной Γ -образного затвора 0.8 mm [11,12] (рис. 1). Измерения S -параметров проводились в специальном контактном устройстве в диапазоне частот 0.5–18.5 GHz. Из-за погрешности измерений при непосредственном расчете малосигнальных СВЧ-характеристик в ряде случаев возникали биения с достаточно большой амплитудой. Поэтому как для более корректных оценок максимального коэффициента усиления в этом диапазоне, так и для аппроксимации результатов на более высокие частоты были определены параметры стандартной малосигнальной эквивалентной схемы транзисторов [9], использованные при вычислении интересующих величин. Исследовался

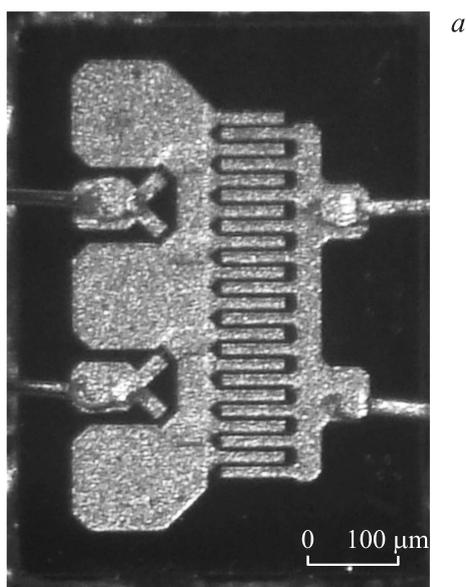


Рис. 1. СВЧ полевой транзистор типа DA-pHEMT на основе гетероструктуры GaAs с дополнительными потенциальными барьерами: *a* — фотография полевого транзистора; *b* — продольный разрез транзистора и упрощенное представление слоев гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием.

максимально возможный коэффициент усиления G_{\max} , достижимый при согласовании входа и выхода транзистора:

$$G_{\max} = \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| (K - \sqrt{K^2 - 1}),$$

где K — коэффициент устойчивости прибора, S_{21} и S_{12} — его S -параметры.

На рис. 2 приведено сравнение G_{\max} для транзисторов, в двух вариантах исполнения: на основе традиционной псевдоморфной гетероструктуры (pHEMT) и на основе гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (DA-pHEMT). Видно, что в большей части диапазона частот, где приборы устойчивы (частоты более 3 GHz), транзисторы на гетероструктуре DA-pHEMT имеют коэффициент усиления

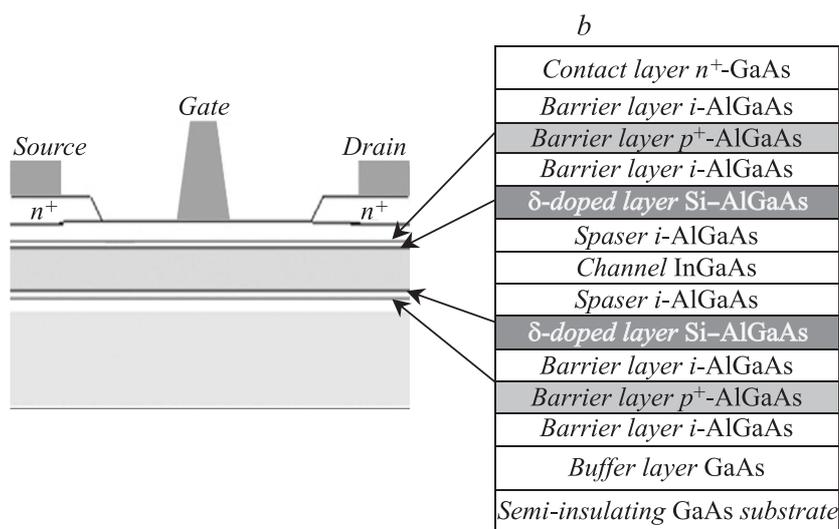


Рис. 1 (продолжение).

на 3–4 dB больше и соответственно сохраняют работоспособность на более высоких частотах. Так, частота, на которой максимально возможный коэффициент усиления становится равен нулю, у них на 40–50% больше, чем в транзисторах на основе гетероструктуры рНЕМТ. Для сравнения результатов оценочных расчетов и результатов измерений на частоте 15 GHz с помощью измерителя с согласующими трансформаторами проводилось прямое измерение максимальной величины малосигнального коэффициента усиления. Для DA-рНЕМТ-транзистора максимальная величина малосигнального коэффициента усиления составила около 15.9 dB, что хорошо согласуется с результатами оценочных расчетов.

Все транзисторы в выбранных вариантах исполнения изготавливались по одинаковой технологии с использованием одного и того же технологического оборудования. Было изготовлено несколько партий таких приборов с практически одинаковой длиной затвора, составляющей около 0.3 μm , что подтверждено измерениями на электронном микроскопе. Можно ожидать, что эффективная длина затвора в таких приборах тоже будет практически одинакова. По крайней мере в

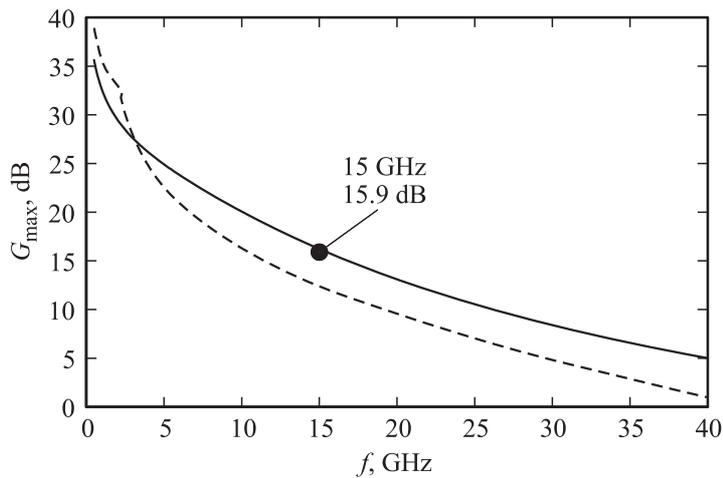


Рис. 2. Зависимости максимально возможного коэффициента усиления при двухстороннем согласовании G_{\max} от частоты f для мощных полевых транзисторов с шириной затвора 0.8 mm на основе традиционной рНЕМТ-гетероструктуры (---) и на основе ДА-рНЕМТ-гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (—). Точкой отмечен результат измерения максимального коэффициента усиления для ДА-рНЕМТ-транзистора на частоте 15 GHz.

ДА-рНЕМТ-транзисторах (напряжение перекрытия в них почти на вольт больше) эффективная длина затвора будет не меньше, чем в традиционных рНЕМТ-транзисторах.

В ДА-рНЕМТ использовались гетероструктуры с подвижностью $\mu \approx 5400 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и с поверхностной плотностью электронов $n_s \approx 4 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$, вычисленными по результатам измерения эффекта Холла. В традиционных рНЕМТ, использованных для сравнения, применялись гетероструктуры с подвижностью $\mu \approx 6000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ и поверхностной плотностью электронов $n_s \approx 3 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-2}$. Даже при худших омических сопротивлениях [7,8,10] малосигнальный коэффициент усиления в ДА-рНЕМТ на 3–4 dB (в 2–2.5 раза) выше, чем у рНЕМТ. Принцип работы обоих типов транзисторов абсолютно одинаков. Малосигнальный коэффициент усиления пропорционален квадрату максимальной частоты усиления по току. В то же время максимальная частота усиления по току пропорциональна средней

дрейфовой скорости электронов под затвором. Откуда автоматически следует, что, несмотря на более низкую слабополевую холловскую подвижность электронов, средняя дрейфовая скорость электронов под затвором в DA-pHEMT заметно (в 1.4–1.6 раза) выше. Из-за более низкой слабополевой подвижности в структурах с донорно-акцепторным легированием очевидно, что наблюдаемый выигрыш в дрейфовой скорости является следствием увеличения дрейфовой скорости именно горячих электронов. Известно, что под затвором с длиной около $0.3 \mu\text{m}$ дрейф электронов существенно нелокален — наблюдается ярко выраженный всплеск дрейфовой скорости [13]. Для того чтобы средняя дрейфовая скорость горячих электронов под затвором была выше, заметно сильнее должен быть и ее всплеск. Ранее говорилось о двух механизмах [8], которые могут отвечать за столь существенное увеличение скорости: сильном уменьшении поперечного пространственного переноса горячих электронов между слоями гетероструктуры и росте дрейфовой скорости электронов за счет увеличения роли размерного квантования электронов в гетероструктурах с дополнительными потенциальными барьерами. Первый механизм является следствием усиления локализации горячих электронов в канале DA-pHEMT-структур и соответственно ослабления взаимодействия горячих электронов с рассеивающим потенциалом примесей. Грубые оценки показывают, что возможности увеличения дрейфовой скорости за счет уменьшения поперечного пространственного переноса и усиления локализации горячих электронов в канале достаточно ограничены — очевиден выигрыш в дрейфовой скорости лишь на 20–30% [8], но этот вопрос требует дополнительных исследований. Второй механизм связан с сильным размерным квантованием в DA-pHEMT-гетероструктурах. В типичной формируемой глубокой (с глубиной $\approx 0.8 \text{ eV}$) квантовой яме DA-pHEMT-структур образуется всего лишь 10–15 размерно-квантовых подзон с расстоянием между ними более 50 meV (что существенно больше величины энергии оптического фонона в канале InGaAs, примерно равной 35 meV). Естественно, в такой квантовой яме оказываются разрешенными к существованию всего лишь 10–15 величин модулей поперечного импульса электронов, что сильно уменьшает количество состояний в пространстве импульсов, в которые могут быть рассеяны электроны. Исходя из приведенных результатов измерений, усиленное размерное квантование в DA-pHEMT-структурах дает свой вклад в увеличение дрейфовой скорости горячих электронов под затвором не меньше, чем эффект от ослабления поперечного пространственного переноса.

Таким образом, сравнение малосигнальных характеристик транзисторов на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием и транзисторов на традиционной структуре показало, что, несмотря на меньшие значения подвижности электронов, DA-pHEMT при прочих равных условиях имеют заметно больший коэффициент усиления, чем обычные pHEMT. Это, скорее всего, обусловлено тем, что средняя дрейфовая скорость под затвором таких транзисторов заметно (по оценкам в 1.4–1.6 раза) выше. Рост дрейфовой скорости, по-видимому, связан с двумя эффектами, вклад которых сравним: уменьшением роли поперечного пространственного переноса и уменьшением рассеяния горячих электронов из-за увеличения роли размерного квантования в потенциальной яме DA-pHEMT структур.

Список литературы

- [1] Паиковский А.Б., Тагер А.С. // Электрон. техн. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1987. В. 7 (401). С. 29–32.
- [2] Паиковский А.Б., Тагер А.С. // Электрон. техн. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1988. В. 3 (407). С. 28–32.
- [3] Mei X., Yoshida W., Lange M., Lee J. et al. // IEEE Electron Device Lett. 2015. V. 36. N 4. P. 327–329.
- [4] Moschetti G., Leuther A., Maßler, B. Aja et al. // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2015. V. 25. N 9. P. 618–620.
- [5] Campos-Roca Y., Tessmann A., Amado-Rey B., Wagner S. et al. // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2014. V. 24. N 11. P. 787–789.
- [6] Лукашин В.М., Паиковский 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.
- [7] Журавлев К.С., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Паиковский А.Б., Соколов А.Б., Торопов А.И. // Электрон. техн. Сер. 1. СВЧ-техника. 2012. В. 1(512). С. 55–61.
- [8] Лукашин В.М., Паиковский 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.
- [9] Шварц Н.З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. М.: Сов. радио, 1980.
- [10] Лукашин В.М., Паиковский А.Б., Лапин В.Г., Щербаков С.В., Капралова А.А., Журавлев К.С., Торопов А.И. // Электрон. техн. Сер. 1. СВЧ-техника. 2014. В. 3 (522). С. 5–14.
- [11] Лапин В.Г., Лукашин В.М., Петров К.И., Темнов А.М. // Электрон. техн. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. В. 4 (511). С. 59–71.
- [12] Кувшинова Н.А., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Петров К.И. // Радиотехника. 2011. В. 11. С. 90–93.
- [13] Shur M. // Electron. Lett. 1976. V. 12. N 23. P. 615–616.