

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

¹АО «Научно-производственное предприятие «Исток» им. Шокина»

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова

Полевые транзисторы на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием

Представлены результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием на основе арсенида галлия с дополнительными резкими потенциальными барьерами по краям квантовой ямы на основе слоев с разными типами легирования. Транзисторы в различных вариантах исполнения продемонстрировали рост выходной мощности и коэффициента усиления в полтора - два раза, по сравнению с приборами на традиционных гетероструктурах. Проанализированы проблемы, возникающие при создании данного типа транзисторов. Проведена оценка перспектив развития данного типа приборов.

Ключевые слова: полевой транзистор, широкозонные материалы, донорно-акцепторное легирование

В последние годы в мире наблюдается стремительное улучшение характеристик мощных полевых транзисторов на основе широкозонных материалов, особенно на основе нитрида галлия [1]. Приборы демонстрируют рекордные характеристики, как в сантиметровом, так и миллиметровом диапазоне длин волн [2-4]. Однако, несмотря на определенную эйфорию, вызванную этими успехами, приходится отметить, что транзисторы на широкозонных материалах имеют ряд принципиальных недостатков, например, более низкое быстродействие и заметно большую нелинейность амплитудно-частотной характеристики, что существенно снижает перспективность использования их в ряде систем. Определенной альтернативой широкозонным материалам может служить новый тип гетероструктур на основе арсенида галлия – гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием [5-8], несколько лет назад разработанные в АО «НПП «Исток» им. Шокина» и изготовленные в Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. Главная отличительная черта данных гетероструктур – дополнительные высокие и резкие потенциальные барьеры на основе донорно-акцепторного легирования по краям обычной квантовой ямы, залитой электронами. Дело в том, что для увеличения выходной СВЧ мощности при разработке гетероструктур для DpHEMT (double channel pseudomorphic high electron mobility transistor) транзисторов важно обеспечить максимальную проводимость канала на участке насыщения выходных ВАХ. Попытки оптимизации в этом направлении гетероструктур для мощных pHEMT и DpHEMT сталкиваются с набором жестких физических и технологических ограничений, которые, на первый взгляд, не позволяют получать удельную выходную мощность серийных гетероструктурных полевых транзисторов заметно больше 1 Вт/мм в X-диапазоне [9].

Одним из основных механизмов, ограничивающих эту мощность в pHEMT, является поперечный пространственный перенос электронов из InGaAs канала гетероструктуры, возникающий при их разогреве продольным электрическим полем (рис.1). Перенос приводит к усилению заполнения горячими электронами слоев AlGaAs вблизи доноров, что снижает подвижность горячих электронов. Типичная величина разрыва дна зоны проводимости на

гетерогранице AlGaAs-InGaAs в рНЕМТ и в DpНЕМТ сравнительно мала и составляет примерно 0,3 эВ. Такой глубины потенциальной ямы InGaAs-канала недостаточно для сохранения преимущественной локализации электронов в InGaAs канале при их сильном разогреве, характерном для работы рНЕМТ и DpНЕМТ.

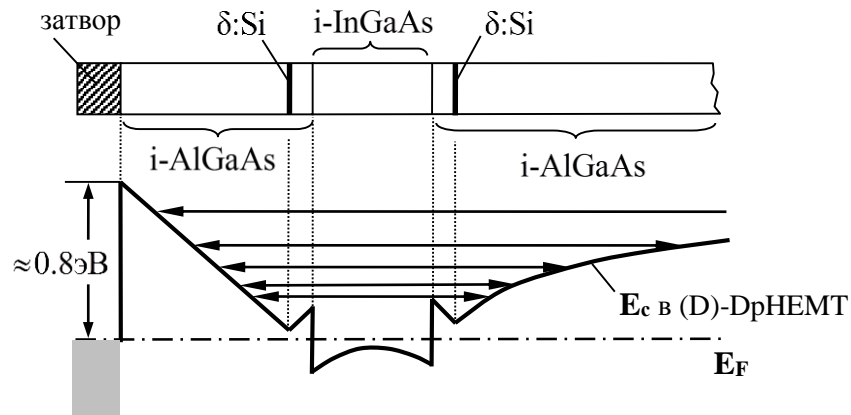


Рисунок 1. Зонная диаграмма DpНЕМТ гетероструктуры с контактом Шоттки. Стрелки показывают область расположения горячих электронов с различной энергией, показано проникновение горячих электронов в AlGaAs слои. *i* - нелегированные слои.

Похожий эффект наблюдается при попытках увеличения уровня легирования рНЕМТ и DpНЕМТ гетероструктур донорами: потенциальная яма InGaAs канала оказывается полностью заполненной электронами, начинается параллельное заполнение электронами AlGaAs слоев. В результате даже слабополевая подвижность электронов оказывается недопустимо малой, проводимость канала и выходная СВЧ мощность практически перестает увеличиваться при росте уровня легирования донорами.

Простые оценки показывают, что при введении в структуру встроенных потенциальных барьеров, усиливающих локализацию горячих электронов в слое InGaAs канала, степень их локализации в AlGaAs слоях может уменьшиться в несколько раз.

Существует проблема выбора оптимального метода создания достаточно высоких и резких локализирующих потенциальных барьеров, пригодных для обеспечения хорошей локализации горячих электронов. Пока не существует сравнительно узкозонных гетероструктур с большим (более 0,5 эВ) разрывом дна зоны проводимости, технологии которых освоены в серийном производстве. По этой причине было выбрано решение – для построения локализирующих барьеров использовать донорно-акцепторное легирование широкозонных слоев в уже освоенных традиционных DpНЕМТ гетероструктурах.

Локализирующие барьеры в (DA)-DpНЕМТ гетероструктурах формировались с помощью встроенных полей зарядов доноров и акцепторов в $Al_xGa_{1-x}As$ слоях с $x \leq 0,35$. Задавался *p-i-n* профиль легирования при избыточном легировании донорами. Использовалась технология дельта-легирования донорами ($\delta:Si$), дающая максимальную локализацию горячих электронов в слое InGaAs канала. При этом каждый ($\delta:Si$)-слой выполняет двойную функцию: участвует в формировании локализирующего барьера и обеспечивает поставку

электронов в InGaAs канал. Схематические зонные диаграммы (DA)-DpHEMT гетероструктуры в сравнении с DpHEMT гетероструктурой показаны на рис.2.

(DA)-DpHEMT гетероструктура имеет следующие потенциальные преимущества перед традиционной DpHEMT гетероструктурой:

- уменьшение рассеяния горячих электронов в широкозонном материале за счет уменьшения толщины слоя широкозонного материала, в котором они могут находиться, уменьшения величины квадрата волновой функции электронов вблизи высоких локализирующих барьеров и усиления эффекта размерного квантования;
- увеличение поверхностной плотности электронов в сравнительно более узкой и глубокой квантовой яме канала;
- уменьшение туннельного переноса электронов между затвором и каналом за счет увеличения средней толщины потенциального барьера контакта Шоттки;
- уменьшение поверхностной плотности горячих электронов в широкозонных слоях и улучшение управления током стока при больших прямых смещениях контакта Шоттки.

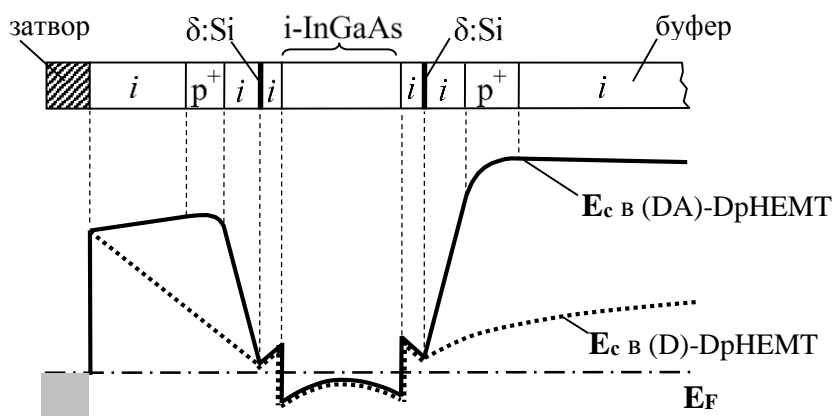


Рисунок 2. Сравнение зонных диаграмм AlGaAs-InGaAs-GaAs DpHEMT структур с донорным (D) и с донорно-акцепторным (DA) легированием. i - нелегируемые слои, p^+ -легированные бериллием (Be) слои.

Формирование в AlGaAs слоях (DA)-DpHEMT гетероструктуры высоких локализирующих потенциальных барьеров и увеличение плотности электронов в слое InGaAs канала позволяет создавать мощные транзисторы, имеющие на частоте 10 ГГц удельную выходную мощность, коэффициент усиления и КПД в импульсном режиме более 1,8 Вт/мм, 9,8 дБ и 50% при длине трапецевидного затвора 0,5 мкм. Таким образом, удельная мощность приборов была повышена почти в два раза.

Одним из интересных свойств данных приборов является высокая линейность амплитудно-частотной характеристики и резкое насыщение выходной мощности. В [8] было показано, что оптимизация соотношения толщин слоев $i-p-i-(\delta:Si)$ структуры в барьере Шоттки позволяет создавать мощные транзисторы, наиболее эффективно работающие при нулевом смещении на затворе и имеющие на частоте 10 ГГц удельную выходную мощность, коэффициент усиления и КПД более 1,5 Вт/мм, 12,5 дБ и 40% при длине Г-образного затвора равной 0,3 мкм и компрессии коэффициента усиления менее 1дБ. Что говорит о высокой

перспективности использования данного типа транзисторов в системах, требующих низких интермодуляционных искажений выходного сигнала.

Полученные результаты позволяют предположить, что при уменьшении длины затвора менее 0,25 мкм и дальнейшем совершенствовании структур можно выйти на следующие параметры транзисторов с донорно-акцепторным легированием: удельная мощность более 3 Вт/мм, коэффициент усиления в насыщении более 13 дБ, КПД 55 ÷ 60% при уменьшении максимальной мощности не более чем на 20 %. Коэффициент усиления более 10 дБ для мощного транзистора — избыточный. Использование таких приборов может быть затруднено из-за проблем с самовозбуждением. Однако он позволяет ввести в такие приборы полевой электрод [10], 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, то за счет введения полевого электрода можно будет выйти на уровень 6 Вт/мм при коэффициенте усиления 8–9 дБ, то есть 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 [11].

Еще более перспективным выглядит использование гетероструктур с донорно-акцепторным легированием в 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 [11]. В настоящее время непосредственно измеренный малосигнальный коэффициент усиления транзисторов на гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием составляет около 16 дБ, при длине Г-образного затвора менее 0,3 мкм. Если приведенные выше оценки верны, то на новых структурах коэффициент усиления 7 дБ можно будет получить в насыщении мощности при длине затвора 0,25 мкм.

Крайне заманчиво выглядит использование донорно-акцепторного легирования и для маломощных транзисторов, особенно в мм-диапазоне длин волн. Простая грубая оценка 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 специальных вариантов конструкции структур с донорно-акцепторным легированием для маломощных транзисторов и изготовление приборов на их основе.

Одно из возможных достоинств, разработанных гетероструктур — это 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 полевых транзисторов при нанометровых длинах затворов, и возможно, проблемы токов утечки в цифровой технике при переходе к транзисторам с длинами затворов порядка 10 нм.

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 канале), то они могут начать испытывать серьезную конкуренцию в X-диапазоне и на более высоких частотах со стороны приборов с донорно-акцепторным легированием.

Библиографический список

1. Кищинский А.А. Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития. – Материалы 19-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, Вебер, 2009, с.11–16.
2. R.S.Pengelly, S.M.Wood, J.W.Milligan, S.T.Sheppard, A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012 v.60, № 6, p.1764-1783
3. F.Medidoub, Y.Tagro, M.Zegaoui, B.Grimbert et al. Sub-1-dB Minimum-Noise-Figure Performance of GaN-on-Si Transistors Up to 40 GHz// IEEE Electron Device Letters, 2012, v.33, № 9, p.1258-1260.
4. F.Medidoub, B.Grimbert et al. Record combination of power-gain frequency and three-terminal breakdown voltage for GaN-on-Silicon devices //Appl.Phys.Express, 6 (2013) 044001.
5. Патент РФ на полезную модель №80069 по заявке № 2008133793. Приоритет от 19.08.2008. Гетерозипитаксиальная структура для полевых транзисторов// Е.И.Голант, К.С.Журавлев, В.Г.Лапин, В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, Ю.Н.Свешников.
6. В.М. Лукашин, А.Б.Пашковский, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, В.Г.Лапин, А.Б.Соколов “Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов” Письма в ЖТФ, 2012, т.38, в. 17, стр. 84-89.
7. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова “Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием” // Физика и Техника Полупроводников, 2014, том 48, В.5, с. 684-692.
8. В.М.Лукашин, А.Б.Пашковский, В.Г.Лапин, С.В.Щербаков, К.С.Журавлев, А.И.Торопов, А.А.Капралова “Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры” // Письма в ЖТФ, 2015, том 41, вып. 3, с. 81 – 87.
9. TriQuint Semiconductor, Advance Product Information, September 19, 2005 Web: www.triquint.com.
10. Y-F Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard, P.M. Chavarkar, T. Wisleder, U.K. Mishra, and P.Parikh, “30-W/mm GaN HEMTs by Field Plate Optimization,” IEEE Electron Dev. Lett., vol. 25, pp. 117-119, Nov.2004.
11. Патент РФ №2463685 по заявке № 2011123071. Приоритет от 07.06.2011. Мощный полевой транзистор// А.А.Воробьев, А.В.Галдецкий, В.Г.Лапин.