

06

Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов

© В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов

Научно-производственное предприятие „Исток“ Фрязино,
Московская область

E-mail: solidstate10@mail.ru

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск

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

НИИ микроэлектроники и информационно-измерительной техники „НИИ МЭИИТ“, Москва

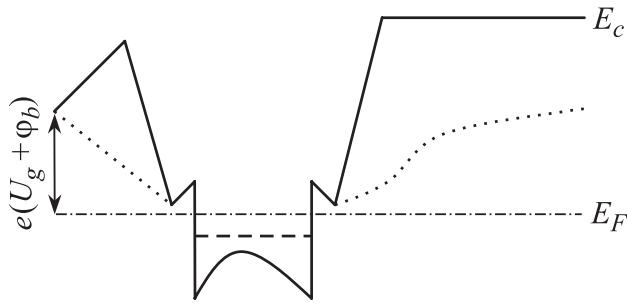
E-mail: lvm54@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2012 г.

Представлены первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах на основе арсенида галлия с квантовой ямой и дополнительными потенциальными барьерами, оптимизированными для уменьшения роли поперечного пространственного переноса электронов. Транзисторы продемонстрировали рост мощности в полтора раза и при длине затвора 0.4–0.5 μm и общей ширине затвора транзистора 0.8 mm на частоте 10 GHz имеют коэффициент усиления более 8 dB, удельную выходную мощность более 1.4 W/mm, КПД по добавленной мощности до 50%.

Мощные СВЧ-транзисторы типа рНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) на основе псевдоморфных гетероструктур AlGaAs–InGaAs–GaAs являются ключевым элементом устройств сантиметрового и миллиметрового диапазонов и поэтому во всем мире активно ведутся исследования, направленные на совершенствование конструкции гетероструктур и улучшение параметров таких приборов. Так как в соответствии с простейшей оценкой выходная мощность пропорциональна произведению рабочего тока на напряжение, то при разработке гетероструктур для мощных полевых транзисторов обычно

стремятся добиться максимальной проводимости канала. Попытки оптимизации гетероструктур для мощных полевых рНЕМТ транзисторов сталкиваются с большим набором жестких физических и технологических ограничений, которые, на первый взгляд, не позволяют получать удельную выходную мощность серийных транзисторов заметно больше 1 W/mm [1]. Одним из важных механизмов, ограничивающих мощность гетероструктурных транзисторов, является поперечный пространственный перенос электронов между слоями гетероструктуры. Дело в том, что при субмикронной длине затвора ток, текущий через транзистор, определяется не только подвижностью и поверхностной плотностью электронов в канале, но и всплеском дрейфовой скорости электронов под затвором. В свою очередь, величина всплеска дрейфовой скорости зависит как от подвижности электронов, так и от поперечного переноса электронов в гетероструктуре и интенсивности рассеяния электронов в широкозонном материале, особенно при положительных напряжениях на затворе транзистора [2]. В данной работе для увеличения плотности электронов в канале и сохранения высокой проводимости канала в условиях сильного термополевого разогрева электронов за счет уменьшения поперечного переноса электронов в гетероструктуре и подавления выброса горячих электронов из канала InGaAs транзистора, предлагается создать дополнительные потенциальные барьеры для электронов, сформированные вокруг канала. Простейшие оценки показывают, что в этом случае число горячих электронов в широкозонном материале при открытом затворе может уменьшиться в несколько раз. На этом пути, однако, существует серьезная технологическая проблема получения достаточно высоких и резких потенциальных барьеров для горячих электронов. Использование гетеробарьеров AlGaAs не дает нужного эффекта, так как ширина запрещенной зоны при повышении содержания алюминия увеличивается не достаточно сильно, кроме того, в слоях AlGaAs с большим содержанием алюминия (молярная доля больше 0.35) формируются глубокие DX-центры, захватывающие электроны, и происходит инверсия долин в зоне проводимости [3], что резко усиливает интенсивность рассеяния горячих электронов, проникающих в широкозонные слои [4]. Создать достаточно высокие барьеры можно при биполярном легировании гетероструктур [5–8]. При объемном легировании, однако, потенциальные барьеры получаются слишком плавными и не оказывают положительного влияния на параметры прибора, зато наличие



Схематическая зонная диаграмма разработанной рНЕМТ-структуры: e — заряд электрона ϕ_b — потенциал барьера Шоттки, U_g — напряжение на затворе, точки — зонная диаграмма обычной рНЕМТ-структуры без планарного легирования акцепторами.

акцепторной примеси в буферном слое приводит к многочисленным технологическим проблемам.

В данной работе дополнительные высокие потенциальные барьеры с практически вертикальными стенками сформированы в слоях AlGaAs, обрамляющих канал транзистора с помощью использования специального профиля примесного легирования. Профиль примесного легирования был выбран в виде $p^+ - i - \delta n$ -структур, имеющих избыточное легирование донорами. При этом встроенное электрическое поле в этих структурах способствует переходу электронов из n -дельта-слоя в канал транзистора, что увеличивает проводимость канала гетероструктуры. Схематически зонная диаграмма структуры AlGaAs–InGaAs–GaAs с $p^+ - i - \delta n$ -структурами показана на рисунке.

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 существенно изменяется на нескольких нанометрах, а концентрация электронов в канале может превышать величину $5.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Экспериментально гетероструктуры AlGaAs–InGaAs–GaAs были выращены в ИФП СО РАН методом молекулярно-лучевой эпитаксии слоев на установке типа Comrast 21 (Рибер, Франция). Холловские

измерения гетероструктур показали достаточно большие поверхностные концентрации электронов $n_s = 4.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ при подвижности электронов $\mu = 5300 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Далее на данных структурах по методике, описанной в работах [9,10], были изготовлены мощные полевые транзисторы со смещенным затвором длиной $0.4\text{--}0.5 \mu\text{m}$ при общей ширине затвора 0.8 mm . Следует отметить, что транзисторы имели обычный затвор с удельным сопротивлением металлизации $100 \Omega/\text{mm}$, а не Т-образный с удельным сопротивлением около $20 \Omega/\text{mm}$. Ранее при такой конструкции транзистора удельная мощность лучших образцов, изготовленных на двойных гетероструктурах ИФП СО РАН и СПб АУ НОЦНТ РАН, не превосходила 0.9 W/mm .

Измерения показали, что новый прибор имеет 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. Для СВЧ-измерений транзисторы монтировались на держатели с 50-омными линиями и вставлялись в специальную оправку с согласующими трансформаторами на входе и выходе, которыми проводилась настройка прибора на максимальную мощность. Результаты исследований приведены в таблице, где для транзистора с номером в зависимости от входной мощности P_m и напряжения на стоке U_d приведены выходная мощность P_{out} , коэффициент усиления по мощности Gain, напряжение на затворе U_g , ток стока I_d , коэффициент полезного действия PAE, удельная выходная мощность P_{out}/L_g .

Из приведенных данных видно, что транзисторы, полученные на структурах с дополнительными потенциальными барьерами, демонстрируют рост удельной выходной мощности более чем в полтора раза (она достигает величин более 1.4 W/mm), достаточно высокие КПД и коэффициент усиления более 8 dB на частоте 10 GHz . Мы полагаем, что оптимизация конструкции гетероструктур и СВЧ-транзисторов может дополнительно повысить их параметры.

Таким образом, представлены первые результаты разработки мощных полевых транзисторов на гетероструктурах на основе арсенида галлия с квантовой ямой и дополнительными потенциальными барьерами, сформированными с помощью $p^+ - i - \delta n$ -слоев и оптимизированными для уменьшения роли поперечного пространственного переноса. Транзисторы с длиной затвора $0.4\text{--}0.5 \mu\text{m}$ и общей шириной затвора

Результаты измерений транзистора Пират-8 (Б)

№	U_d , V	P_{in} , mW	P_{out} , mW	Gain, dB	I_d , mA	U_g , V	PAE, %	P_{out}/L_g , W/mm	
1	8	10	135	11.2	160	-0.61			
	8	50	535	10.2	180	-0.56			
	8	100	880	9.4	210	-0.49		1.1	
	8	150	1040	8.4	220	-0.47	50	1.3	
	8	170	1070	8	230	-0.49	49	1.34	
	9	10	140	11.4	160	-0.61			
	9	50	525	10.2	190	-0.56			
	9	100	900	9.5	220	-0.47		1.12	
	9	150	1100	8.7	230	-0.45	46	1.38	
	9	170	1140	8.3	240	-0.5	45	1.42	
	2	8	10	110	10.4	150	-0.56		
		8	50	445	9.5	160	-0.56		
8		100	750	8.75	190	-0.54		0.94	
8		150	1010	8.3	210	-0.52	51	1.26	
8		170	1075	8	220	-0.50	51	1.34	
9		10	100	10	160	-0.65			
9		50	410	9.1	190	-0.61			
9		100	740	8.7	200	-0.58		0.92	
9		150	1050	8.45	230	-0.52	43	1.31	
9		170	1150	8.3	240	-0.5	45	1.44	
3		8	170	1090	8.1	240	-0.8	48	1.36
		9	10	90	9.5	225	-0.55		
	9	50	450	9.5	250	-0.55			
	9	100	780	8.9	270	-0.49		0.97	
	9	150	1060	8.5	270	-0.53	38	1.33	
	9	170	1140	8.3	270	-0.58	40	1.42	

0.8 mm, изготовленные с применением оптической литографии и наклонного напыления, имеют на частоте 10 GHz удельную выходную мощность более 1.4 W/mm (что в полтора раза превосходит величины, полученные ранее для этих приборов на обычных гетероструктурах), коэффициент усиления более 8 dB и КПД по добавленной мощности до 50%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Список литературы

- [1] *TriQuint Semiconductor*, Advance Product Information. September 19, 2011. Web: www.triquint.com.
- [2] *Климова А.В., Лукашин В.М., Пашковский А.Б.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 1. С. 113–118.
- [3] *Saxena A.K.* // J. Phys. C. 1980. V. 13. N 23. P. 4322–4334.
- [4] *Грибников З.С., Райчев О.Э.* // ФТП. 1989. Т. 23. В. 12. С. 2171–2178.
- [5] *Zou J., Abid Z., Dong H., Gopinath A.* // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 21. P. 2411–2413.
- [6] *Zou J., Dong H., Gopinath A., Shur M.S.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1992. ED-39. N 2. P. 250–256.
- [7] *Патент РФ* на полезную модель № 80069 по заявке № 208133793. Приоритет от 19.08.2008 // Е.И. Голант, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, Ю.Н. Свешников.
- [8] *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. С. 312.
- [9] *Lapin V.G., Temnov A.M., Petrov K.I., Krasnik V.A.* // GaAs 2000 Conference proceedings. 2nd-3rd October 2000. P. 314–317.
- [10] *Лапин В.Г., Красник В.А., Петров К.И., Темнов А.М.* // Одиннадцатая Международная конференция „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. Сборник материалов конференции. 10–14 сентября 2001 г. Севастополь, Крым, Украина. С. 135–136.