

Б.И.Селезнев, Л.М.Семенова

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУР СВЧ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Институт электронных и информационных систем НовГУ

Diagnostics results of kvantovo-dimensional heterostructures on gallium arsenide, using Hall and ellipsometric measurements techniques under level-by-level etching, are represented. Estimations of influence of both technology factors and type of initial epitaxial structures on the channels resistance of field-effect transistors with Schottky-barrier are carried out. Substantiated option of structures type for switching-type transistor manufacturing is represented.

Введение

На современном этапе развития радиоустройств СВЧ все большее применение находят передающие, приемные и приемопередающие активные фазированные антенные решетки (АФАР) [1]. Ключевым элементом АФАР являются приемопередающие модули (ППМ), обеспечивающие управление по амплитуде и фазе распределения сигнала в апертуре решетки. Требования идентичности ППМ обусловлены принципом работы АФАР, обеспечить же выполнение этих требований по электрическим параметрам проще при использовании в качестве функционально законченных блоков монолитных интегральных схем. Одним из основных элементов ППМ является устройство, обеспечивающее управление сигнала по амплитуде, — аттенуатор. На практике чаще всего используются аттенуаторы на основе $p-i-n$ диодов или полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) [2].

В настоящее время широкое применение нашли аттенуаторы на ПТШ. Преимущества их перед аттенуаторами на $p-i-n$ диодах состоят не только в технологической возможности интеграции на кристалле всей схемы, т. е. создания монолитной схемы, но и в отсутствии потребляемого тока в цепи управления.

Применение гетероструктур (структур переменного состава AlGaAs/GaAs или AlGaAs/InGaAs) с селективным легированием вместо структур на GaAs позволяет достичь повышения СВЧ параметров полевых транзисторов с барьером Шоттки. Это является следствием реализации в такой структуре механизма локализации электронов в тонком слое полупроводника (так называемый двумерный электронный газ). Наноразмерность проводящего слоя и его вытеснение в нелегированный материал приводят к существенному возрастанию подвижности электронов и скорости их насыщения, что благоприятно сказывается на работе транзистора в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [3]. Уровень развития эпитаксиального наращивания в России позволяет получать гетероструктуры с плотностью электронов в двумерном проводящем слое до $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (более $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ в случае «двусторонних» гетероструктур), которые могут служить исходным материалом для рНЕМТ (pseudomorphic high electron mobility transistor) с удельной плотностью тока 300 мА/мм .

Один из основных параметров, определяющих свойства аттенуатора, — потери при прохождении

сигнала через ПТШ, минимизация которых является довольно сложной и актуальной проблемой. Потери в ПТШ прежде всего связаны с конечным сопротивлением ключа: не равным нулю в открытом состоянии и не равным бесконечности в закрытом состоянии. Транзисторы, используемые в аттенуаторах в качестве ключей, должны иметь ток стока не больше 100 мкА при напряжении затвора $2,5\text{--}3 \text{ В}$.

В работе рассматриваются методики оценки качества исходных гетероструктур и рассматриваются возможности уменьшения сопротивления транзистора в открытом состоянии за счет использования современных гомо- и гетероэпитаксиальных структур на основе арсенида галлия.

Диагностика гетероструктур

В качестве тестовых структур, на которых опробованы методики диагностики, были использованы гетероэпитаксиальные структуры GaAs/GaAlAs/GaAs (так называемые НЕМТ-структуры) (рис.1).

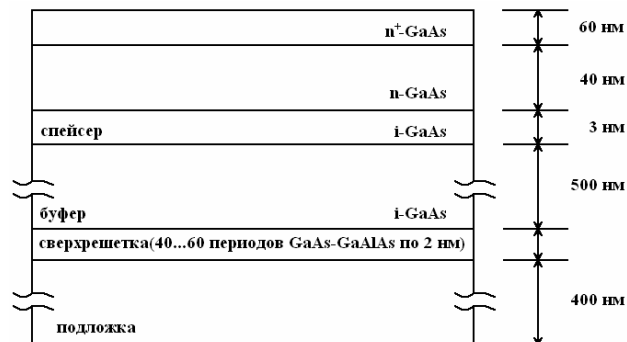


Рис.1. Схематическое изображение гетероструктуры GaAs/GaAlAs/GaAs

Подвижность электронов и поверхностная концентрация — две ключевые характеристики гетероструктур, определяемые параметрами роста и составом слоев. Они связаны с характеристиками полевых транзисторов и являются мерой качества гетероструктур. Электрофизические параметры гетероструктур (поверхностное сопротивление R_s , поверхностная концентрация n_s , эффективная подвижность $\mu_{\text{эф}}$) измерялись холловским методом Ван-дер-Пау при температурах 77 К и 300 К . Форма образца выбиралась в виде квадрата $8 \times 8 \text{ мм}$. Контакты наносились вплавлением олова по углам квадрата. Магнитная индукция составляла $0,39 \text{ Тл}$ [4].

Измеряемая гетероструктура резко неоднородна по проводимости: верхний высокопроводящий n^+ -слой GaAs, далее n -слой GaAlAs и слой двумерного газа с высокой проводимостью при 77 К, сравнимой с проводимостью n^+ -слоя. Измеряемые начальные значения электрофизических параметров при комнатной температуре в основном соответствуют параметрам n^+ -слоя, а при 77 К являются эффективными. Поэтому для определения параметров двумерного газа необходимо прецизионно удалить шунтирующий слой.

Послойное удаление n^+ -GaAs слоя проводилось анодным окислением с автоматическим контролем толщины анодного окисла по коэффициенту отражения лазерного излучения ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) в процессе окисления. В результате одного анодирования снимается слой толщиной $\Delta x = 0,75 \cdot d_{\text{ОК}}$ ($d_{\text{ОК}}$ — толщина анодного окисла).

Переход n^+ -GaAs — n -GaAlAs фиксировался по следующим наблюдениям: появление цветности; несмачиваемость поверхности GaAlAs в отличие от GaAs, $n_S(300 \text{ K}) = n_S(77 \text{ K})$.

В табл.1 приведены результаты измерений электрофизических характеристик для двух состояний образцов: начальные значения и после удаления шунтирующего n^+ -слоя GaAs.

Исследование сопротивления канала транзистора

Были исследованы транзисторы, изготовленные на гетероэпитаксиальных структурах AlGaAs/InGaAs/GaAs, и транзисторы, изготовленные на эпитаксиальных структурах арсенида галлия (поперечный разрез и топология исследуемых транзисторов приведены на рис.2 и 5). Проведен сравнительный анализ сопротивлений канала транзисторов.

Сопротивление ПТШ R_{VT} , Ом рассчитывается на начальном участке ВАХ транзистора, характеризующегося линейной зависимостью тока стока (I_c) от напряжения сток-исток ($U_{си}$). Выходное сопротивление ПТШ, при отсутствии управления на затворе, складывается из двух сопротивлений:

$$R_{VT} = R_K + R_{OK},$$

где R_K — сопротивление канала ПТШ в открытом состоянии, Ом; R_{OK} — сопротивление омических контактов ПТШ (стока и истока), Ом. Для уменьшения сопротивления ПТШ необходимо уменьшать обе составляющие его сопротивления при сохранении высокочастотных свойств транзистора.

Сопротивление канала определяется следующими параметрами транзистора [5].

Таблица 1

Электрофизические параметры гетероструктур GaAs/GaAlAs/GaAs (начальные) и двумерного газа (после снятия шунтирующего слоя)

Номер образца	T, K	Начальные значения			После снятия шунтирующего слоя		
		R_S , Ом/□	n_S , см ⁻²	μ_S , см ² /В·с	R_S , Ом/□	n_S , см ⁻²	μ_S , см ² /В·с
1	300	124	$2 \cdot 10^{13}$	2570	868	$1,2 \cdot 10^{12}$	5800
	77	60	$6,3 \cdot 10^{12}$	16800	128	$1,1 \cdot 10^{12}$	44100
2	300	137	$1,7 \cdot 10^{13}$	2700	978	$1,1 \cdot 10^{12}$	5680
	77	63	$5,5 \cdot 10^{12}$	2400	132	$1 \cdot 10^{12}$	48400
3	300	—	—	—	1000	$0,8 \cdot 10^{12}$	7738
	77	—	—	—	86	$1,2 \cdot 10^{12}$	61000
4	300	103	$3,7 \cdot 10^{13}$	2000	1500	$0,7 \cdot 10^{12}$	6500
	77	—	—	52000	146	$0,8 \cdot 10^{12}$	54000
5	377	—	$2 \cdot 10^{13}$	—	1300	$0,63 \cdot 10^{12}$	5100
	77	—	—	—	170	$0,6 \cdot 10^{12}$	41000

Из табл.1 следует, что средние параметры двумерного электронного газа при 77 К составляют: $n_S \sim 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu_S \sim 50000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Контроль толщины травливаемого слоя Ga_{1-x}Al_xAs и оценка состава (величины x) проводилась с помощью эллипсометрических измерений при послойном травлении. Для этого применялся лазерный эллипсометр ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) [4].

Сравнение с теоретической номограммой дает $x = 0,25$, толщину слоя AlGaAs — 40 нм. Переход n^+ -GaAs—GaAlAs характеризуется равенством концентраций $n_S(300 \text{ K}) = n_S(77 \text{ K}) = 0,63 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что дает концентрацию носителей заряда в слое GaAlAs $n = 1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

1. Конструкция транзистора, а именно ширина затвора (W_3) и длина канала (L_K). Минимальная длина канала ПТШ ограничивается технологией изготовления и составляет 3 мкм. Выбор максимальной ширины затвора ПТШ ограничивается рабочим частотным диапазоном.

2. Исходный материал. Сопротивление канала определяется характеристиками исходного материала (подвижностью μ и концентрацией носителей заряда n) и практически не может быть увеличено в процессе изготовления транзистора.

Для исследования влияния ширины затвора на сопротивление R_K по групповому комплексу шаблонов были изготовлены транзисторные структуры с различной шириной затвора (150, 300 и 600 мкм).

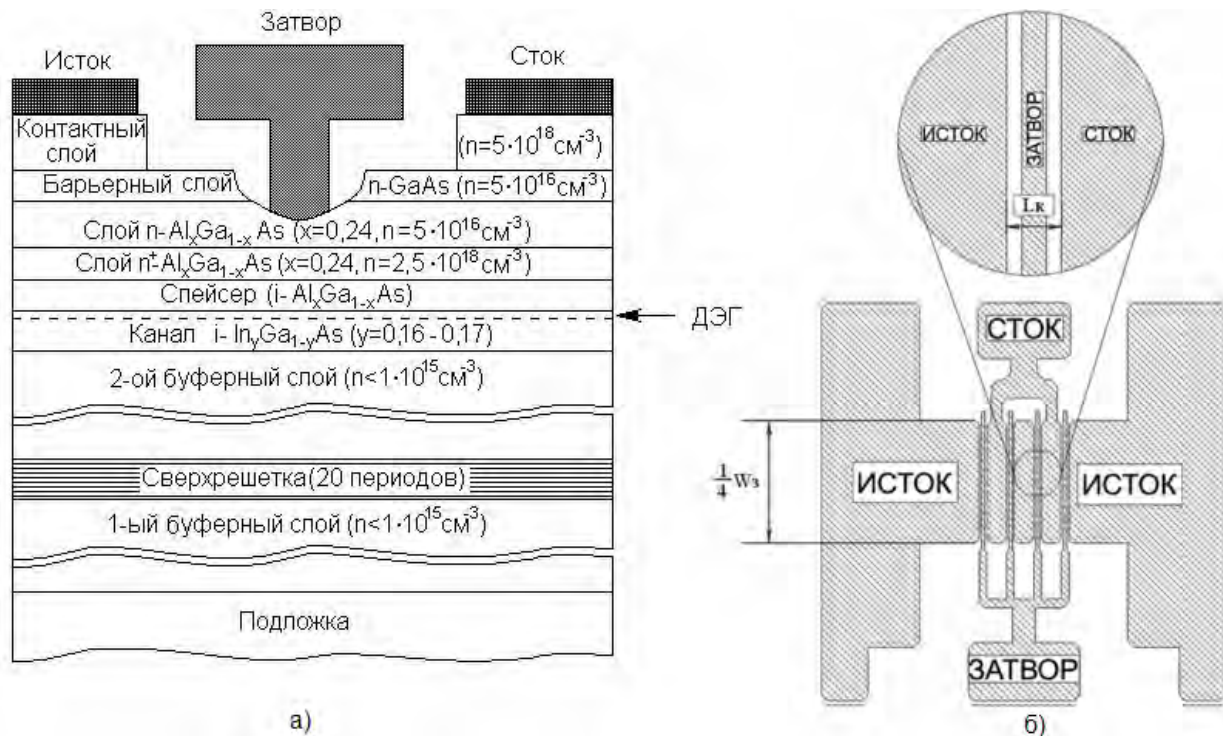


Рис.2. Транзистор, изготовленный на рНЕМТ-структуре: а) поперечный разрез; б) схематическое изображение топологии

Транзисторы изготавливались на структурах типа рНЕМТ (рис.2) на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs, отличительной особенностью которых является наличие двумерного электронного газа (ДЭГ) в активном слое, характеризующегося высокой подвижностью носителей заряда порядка $6500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ и их высокой концентрацией порядка $1,2\cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Учитывая высокие значения произведения $n\cdot\mu$, можно предполагать, что сопротивление канала транзисторов должно быть меньшим по сравнению с транзисторами, изготовленными на других типах эпитаксиальных структур.

Вольтамперные характеристики для транзисторов, изготовленных на рНЕМТ-структуре, представлены на рис.3.

Значения сопротивления ПТШ, представленные на рис.4, имеют одинаковую составляющую — сопротивление омических контактов R_{OK} , которое

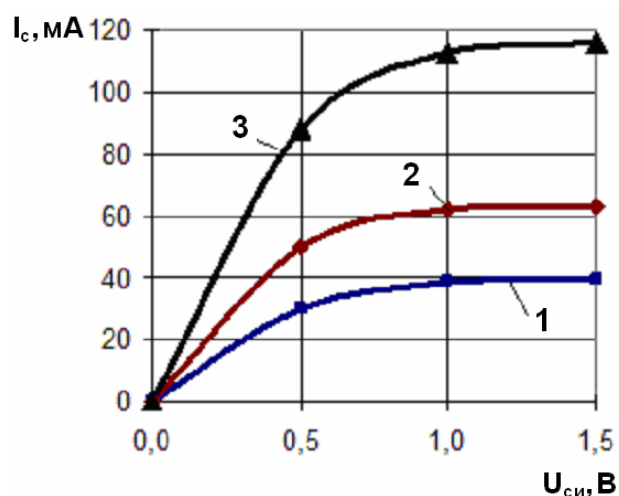


Рис.3. Усредненные ВАХ ПТШ с разной шириной затвора W_z : 1 — 150 мкм, 2 — 300 мкм, 3 — 600 мкм

равно 2-3 Ом, и его вклад не изменяет характера зависимости.

Для исследования возможности получения ключевых транзисторов с малым сопротивлением канала на эпитаксиальных структурах типа САГ-6БК (структура арсенида галлия марки 6БК) были изготовлены транзисторы четырех типов по различной технологии (рис.5), отличающейся в первую очередь уровнем начального тока стока в открытом состоянии, когда напряжение затвор-исток $U_{ЗИ} = 0$. Измерены вольт-амперные характеристики транзисторов, (типичную ВАХ см. на рис.6), а результаты расчета R_K на единичную ширину затвора W_z , равную 1 мм (R_{K1}), представлены в табл.2. Ток стока насыщения $I_{c \text{ нас}}$ определяется по резкому снижению приращения тока при увеличению напряжения сток-исток, а $U_{си \text{ нас}}$ — напряжение насыщения; R_K — сопротивление канала транзистора на линейном участке ВАХ.

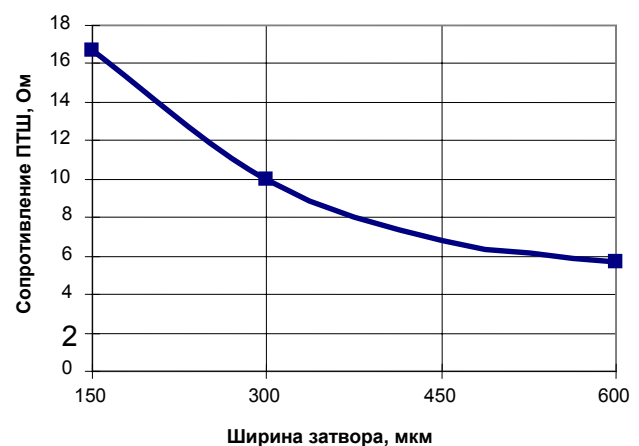


Рис.4. Зависимость сопротивления ПТШ в открытом состоянии от ширины затвора

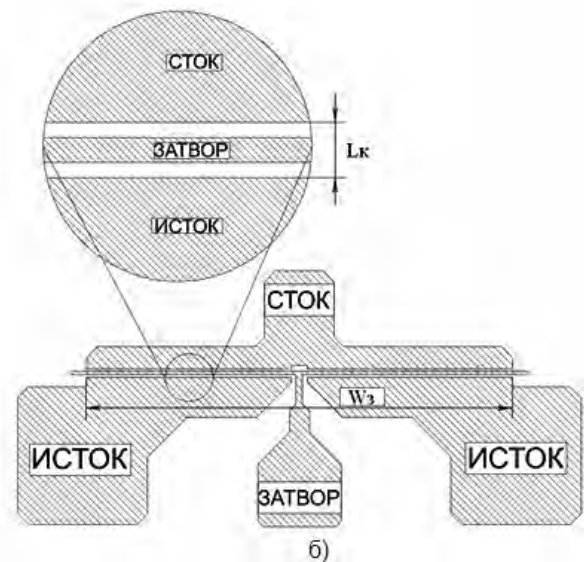
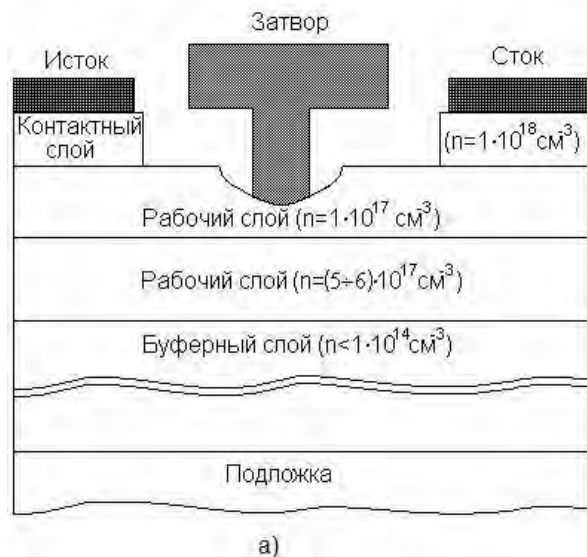


Рис. 5. Транзистор, изготовленный на эпитаксиальной структуре типа САГ-6БК: а) поперечный разрез; б) схематическое изображение топологии

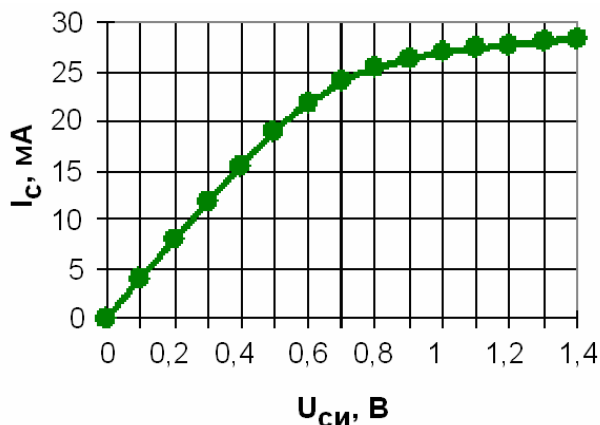


Рис. 6. Типовая ВАХ транзисторов на структуре САГ-6БК

электронов в активной области канала также являются предельными), но и сечением канала, поскольку канал в данном случае является объемным.

Как и ожидалось, наименьшим значением R_K обладают транзисторы с большим начальным током. Транзисторы на эпитаксиальных структурах типа САГ-6БК, изготовленные по различной технологии, отличаются в первую очередь уровнем начального тока стока в открытом состоянии ($U_{зи} = 0$). Таким образом, для транзистора на структуре типа САГ-6БК, характеризующегося максимальным начальным уровнем тока стока для выбранной ширины затвора (табл.2), значение R_K составляет $\sim 1,7$ Ом/мм, что превосходит достигнутые значения R_K на более дорогих структурах типа рНЕМТ.

Заключение

Для диагностики квантово-размерных гетероструктур GaAs/GaAlAs/GaAs были использованы методики на основе холловских и эллипсометрических измерений при послойном травлении. Данные методики могут быть использованы и для диагностики гетероэпитаксиальных структур AlGaAs/InGaAs/GaAs.

На гетероэпитаксиальных и эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия изготовлены транзисторы и проведен сравнительный анализ сопротивлений канала транзисторов, изготовленных на разных типах структур.

Для СВЧ полевых транзисторов с барьером Шотки, изготовленных на гетероструктуре рНЕМТ, сопротивление канала в открытом состоянии при разной ширине затвора воспроизводимо и составляет около 3 Ом/мм.

Эпитаксиальные структуры типа САГ-6БК более предпочтительны для изготовления ключевых транзисторов, поскольку недороги и позволяют получать значения R_K менее 2 Ом/мм.

Таблица 2

Выходное сопротивление ПТШ на эпитаксиальной структуре САГ-6БК в открытом состоянии

Тип	W_z	$I_{c \text{ нас.}}$, мА	$U_{си \text{ нас.}}$, В	R_K , Ом	R_{K1} , Ом
I	50	20	1,0	33,65	1,68
II	100	26	0,8	26,64	2,66
III	150	22	1,0	35,24	5,29
IV	225	52	0,8	13,53	3,04

Обсуждение полученных результатов

Для ПТШ, изготовленных на структурах типа рНЕМТ, значение сопротивления R_K для разной ширины затвора воспроизводимо и соответствует уровню ~ 3 Ом/мм. Дальнейшее уменьшение R_K представляется достаточно проблематичным, так как сопротивление канала определяется характеристиками двумерного электронного газа — произведением $n \cdot \mu$, увеличение концентрации носителей заряда приводит к уменьшению их подвижности.

Для структур типа САГ-6БК сопротивление канала определяется не только характеристиками исходного материала (концентрация и подвижность

1. Вендик О.Г. // Соросовский образовательный журнал. 1997. №2. С.115-120.

2. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г.Гасанов, А.А.Липатов, В.В.Марков, Н.А.Могильченко. М.: Радио и связь, 1988. 288 с., ил.
3. Устинов В.М. и др. // Микроэлектроника. 1994. Т.23. №4. С.13-18.
4. Seleznev B.I. // Third Testing and Computer Simulation in Science and Engineering. St. Petersburg, Russia, June 7-11. 1999. Vol.4064. P.308-315.
5. Селезнев Б.И. // Петербургская электроника. 2005. Вып.3(44). С.4-12.