

УДК 621.382.323

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МАЛОШУМЯЩЕГО pHEMT ТРАНЗИСТОРА СВЧ ДИАПАЗОНА

Э.Ю.Козловский, Б.И.Селезнев, Н.Н.Иванов

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Boris.Seleznev@novsu.ru

Рассматриваются особенности технологии изготовления СВЧ транзистора на pHEMT структурах и оптимизация его конструкции с целью управления параметрами готового прибора и достижения наилучших динамических и СВЧ характеристик. Приведены характеристики малошумящего pHEMT транзистора СВЧ диапазона, разработанного и изготовленного на основе проведенных исследований.

Ключевые слова: pHEMT, травление, атомно-силовая микроскопия, крутизна, СВЧ, коэффициент шума, коэффициент усиления

The article discusses the specifics of manufacturing technology of RF FET based on the pHEMT structure and optimization of its design in order to control the parameters of the device and achieve the best dynamic and RF characteristics. The characteristics of a low-noise pHEMT RF FET, designed and manufactured on the basis of studies carried out, are given.

Keywords: pHEMT, etching, atomic force microscopy (AFM), slope, RF, noise ratio, amplification gain factor

Гетероэпитаксиальные транзисторы в настоящее время занимают лидирующее место при разработке усилительных схем и переключателей СВЧ диапазона. Обладая низким коэффициентом шума, высоким коэффициентом усиления и высокой линейностью в широкой полосе частот, такие приборы позволяют улучшить характеристики СВЧ модулей.

В настоящей работе исследованы структуры со слоем двумерного электронного газа (ДЭГ) на границе раздела $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Подобная модификация транзистора отличается введением между слоем $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и нелегированным GaAs слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ толщиной не более 200 ангстрем и получила название псевдоморфного транзистора с высокой подвижностью электронов (pHEMT).

Вследствие меньшей, чем у GaAs, ширины запрещенной зоны, наличие слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y < 0,3$) позволяет использовать в паре с ним $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с низким содержанием алюминия ($x = 0,2-0,3$). Подобная модификация структуры в конечном итоге устраняет негативные эффекты, такие, как срыв стоковых ВАХ, повышение уровня генерационно-рекомбинационных шумов, фоточувствительность, возникающие в гетеропаре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ по причине высокого содержания алюминия ($x \geq 0,2$) [1].

На рис.1 представлена конструкция гетероструктурного транзистора, реализованного на pHEMT структуре, с указанием основных слоев и их функционального назначения.

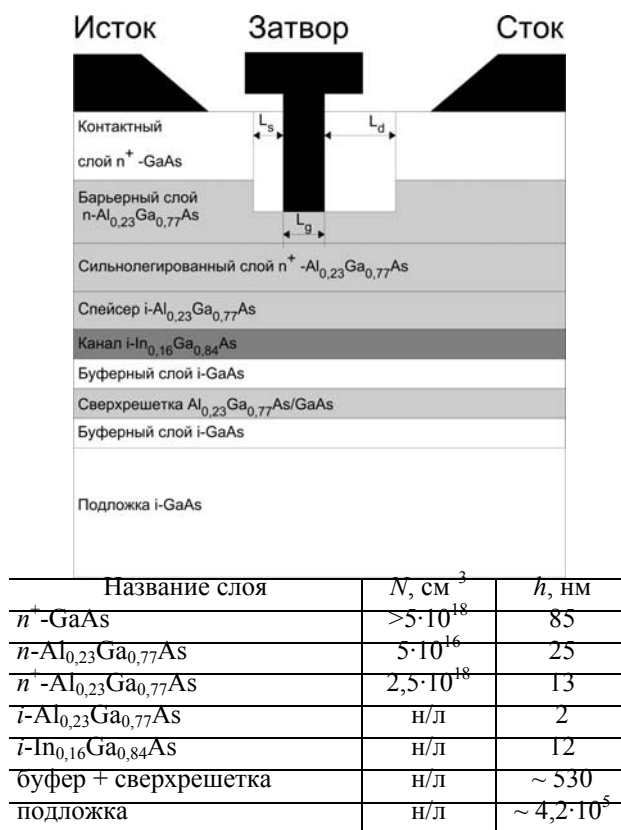


Рис.1. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ pHEMT

Достоинством рНЕМТ наряду с высокой подвижностью и скоростью насыщения носителей заряда в канале является также общность многих технологических процессов и оборудования с применяемыми при изготовлении MESFET транзисторов. Однако несмотря на значительную общность технологий существует ряд особенностей, которые необходимо учитывать при изготовлении рНЕМТ.

1. Изоляция элементов МИС. Наличие в структуре слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ предъявляет более жесткие требования к операциям мезотравления или ионной бомбардировки, используемым при формировании изоляции. Исключение возникновения паразитных токов утечки по объему структуры, возникающих в первую очередь на границе раздела различных соединений (по причине наибольшей дефектности), является необходимым требованием при формировании качественной изоляции отдельных элементов монолитных интегральных схем.

2. Операция химического травления структуры при формировании углубления затвора. Распределение подвижных носителей заряда (электронов) по глубине структуры и малые толщины активных слоев предъявляют существенные требования к прецизионности и селективности химического травления.

3. Присутствие в структуре слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ делает необходимым обеспечение пассивации поверхности с целью исключения накопления поверхностного заряда в области сток-исток, приводящего к температурной нестабильности ВАХ. В процессе изготовления также необходимо избегать возможности контактирования слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с воздухом, поскольку возможно образование на поверхности труднорастворимых соединений, что затрудняет проведение операции химического травления при углублении затвора.

При отработке технологии были опробованы структуры рНЕМТ (рис.1) с различными параметрами ДЭГ: концентрация (n_s) $(1,5-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и подвижность μ_s $5800-6500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ носителей заряда в канальном слое $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($T = 300 \text{ К}$).

В качестве основной цели исследования выступало построение профилей травления гетероструктур и установление связи между параметрами прибора (начальный ток стока $I_{C \text{ нач}}$, крутизна S , напряжение отсечки $U_{\text{отс}}$, напряжения пробоя затвор-сток $U_{\text{проб зс}}$ и затвор-исток $U_{\text{проб зи}}$), параметрами ДЭГ (n_s и μ_s) и конструкцией транзисторной структуры (размещение затвора в области сток-исток и величина его углубления).

Травление проводилось на транзисторных структурах, позволяющих довести технологический процесс изготовления до конечных изделий с возможностью монтажа кристалла в ножку и измерения его параметров. Типовой профиль травления рНЕМТ структуры представлен на рис.2.

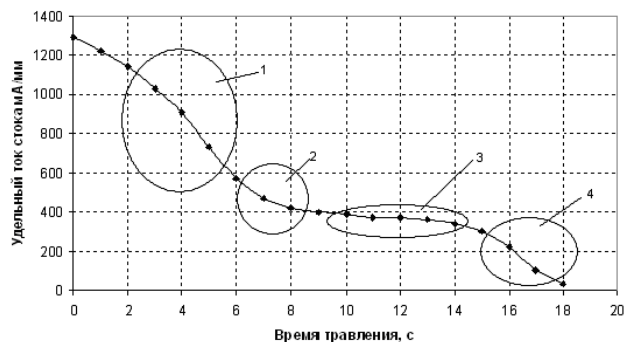


Рис.2. Профиль травления рНЕМТ. Кривая травления имеет четыре выраженных участка: 1 — травление контактного слоя $n^+\text{-GaAs}$; 2 — травление барьерного слоя $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; 3 — травление сильнолегированного $n^+\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (обедненного подвижными носителями заряда); 4 — травление канала $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$

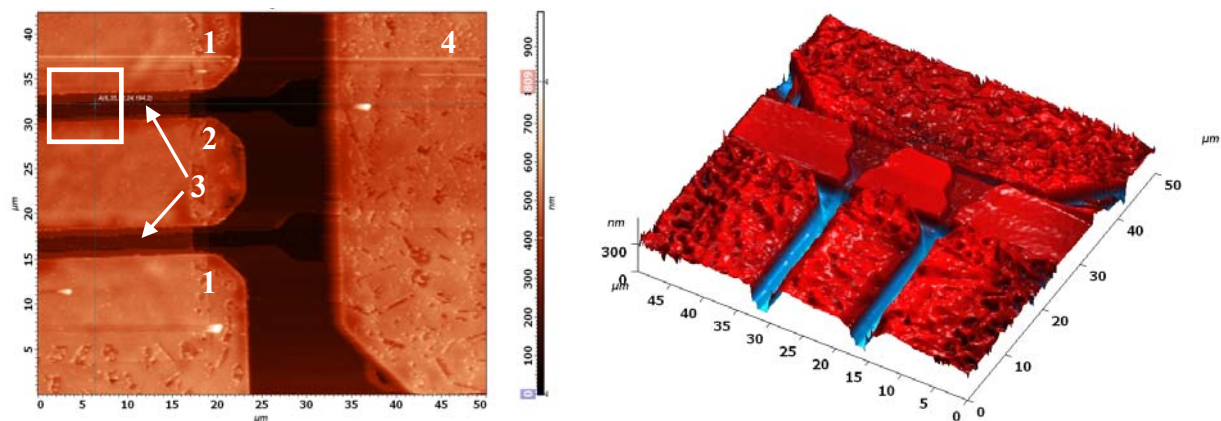
Обобщая результаты по параметрам ДЭГ исходных структур, статическим, динамическим и СВЧ-характеристикам транзисторов, изготовленных на их основе, а также учитывая особенности проведения ряда технологических операций (в первую очередь касающихся формирования затвора), были установлены оптимальные параметры ДЭГ, наилучшим образом обеспечивающие параметры готового прибора: $n_s > 1,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $\mu_s > 5800 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 300 К. При этом важно отметить, что влияние концентрации носителей в ДЭГ n_s на усилительные свойства транзистора является более значимым, чем их подвижность в слабых электрических полях μ_s . Обусловлено это тем, что при работе транзистора в «усилительном» режиме ток стока и крутизна транзистора определяются в значительной степени концентрацией носителей и скоростью их насыщения, тогда как подвижность уже существенным образом зависит от рассеяния в сильных электрических полях, и, соответственно, параметр μ_s выступает скорее в качестве характеристики исходного материала, нежели определяет реальные СВЧ характеристики прибора.

Для структур с оптимальными параметрами ДЭГ применительно к реализации транзисторов на их основе была установлена связь между величиной углубления затвора и характеристиками прибора. В зависимости от момента остановки химического травления при формировании углубления затвора на одной и той же структуре могут быть получены транзисторы с разными параметрами (см. табл.).

Параметры транзисторов

Участок на профиле травления	$U_{\text{отс}}$, В ($U_{\text{си}} = 3 \text{ В}$, $I_c = 1 \text{ мА}$)	$I_{C \text{ нач}}$, мА/мм ($U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$, $U_{\text{си}} = 3 \text{ В}$)	$S_{\text{макс}}$, мА/(В·мм)
1	$\geq 2,0$	350-450	160
2	0,8-2,0	250-350	350
3	0,4-0,8	150-250	300
4	$\leq 0,4$	≤ 150	160

С точки зрения формирования углубления затвора оптимальным является размещение последнего на переходном участке 2-3 (рис.2). При этом достигаются максимальная крутизна ($350 \text{ мА}/(\text{В} \cdot \text{мм})$), оптимальное для использования в маломощном режи-



а

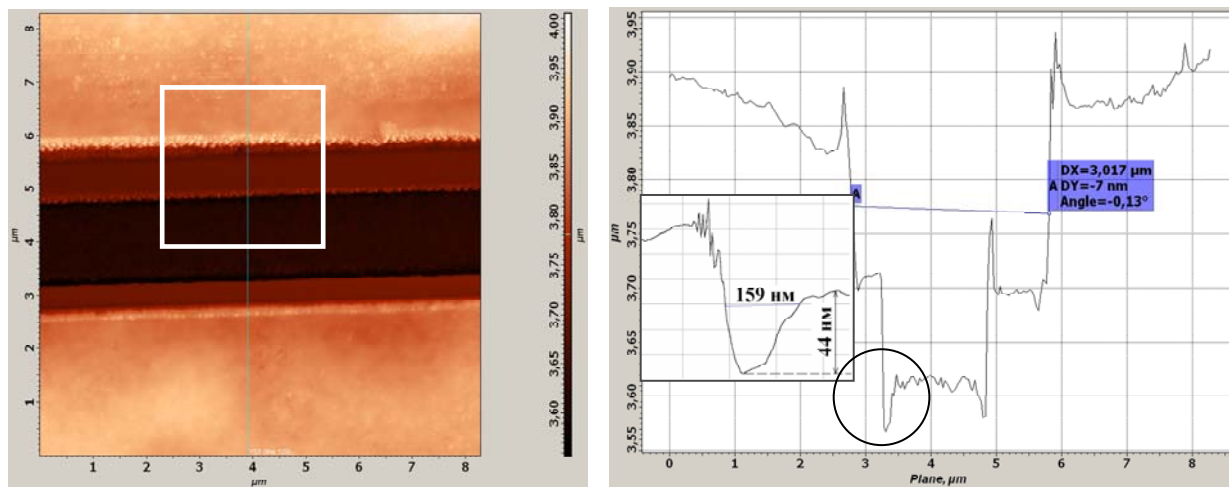
б

Рис.3. Поверхность pHEMT транзисторной структуры после первой корректировки: 1 — исток; 2 — сток; 3 — активная область (без металлизации затвора); 4 — контактная площадка затвора. Области 1, 2 и 4 металлизированы (верхний слой — Ni)

ме напряжение отсечки (0,7-1 В), пробивные напряжения затвор-сток и затвор-исток не менее 5 В по уровню тока затвора 20 мкА.

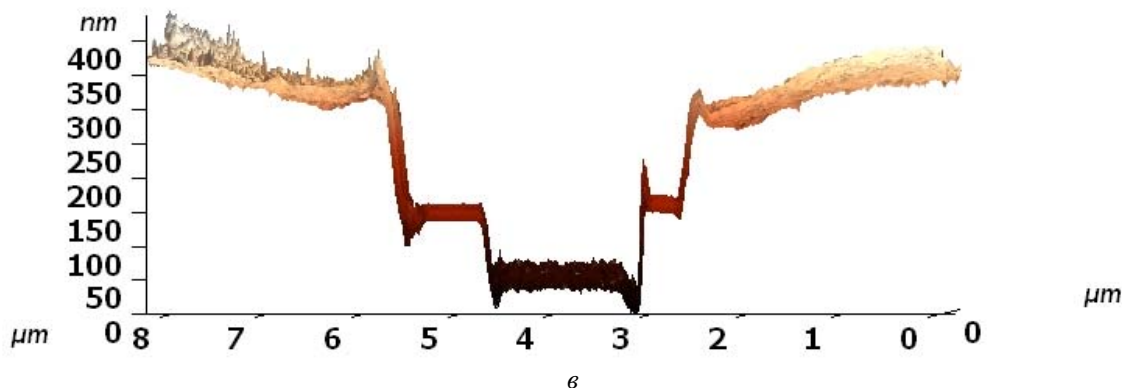
Следует отметить, что переходный участок 1-2 также может быть использован при изготовлении транзисторов pHEMT. Однако параметры полученного транзистора, будут в значительной степени ориентированы на работу последнего в режиме получения максимальной выходной мощности (высокая плотность тока), чем на получение максимального усиления.

При формировании структуры полевого транзистора для улучшения его статических, динамических и СВЧ характеристик необходимо минимизировать расстояние затвор-исток транзистора при сохранении приемлемых пробивных напряжений. Минимизация может быть осуществлена за счет расположения затвора в углублении так, чтобы он был смещен к истоку. При этом важную роль имеет контроль геометрии размещения затвора и величина боковых подтравов на границе защитной маски при проведе-



а

б



в

Рис.4. Исследуемая область, выделенная на рис.3 белым квадратом (а), и профиль вдоль указанного на изображении разреза в 2D (б) и 3D (в) представлениях

нии первой и второй корректировок. В качестве метода диагностики была выбрана атомно-силовая микроскопия (АСМ) [2,3], позволяющая построить геометрический профиль транзисторной структуры (активной области) в сечении сток-исток на различных технологических этапах.

На рис.3 приведено изображение активной области транзистора (области истока, стока, затвора) по данным АСМ после первой корректировки в 2D и 3D представлениях (а и б соответственно).

На рис.4 приведены изображение и профили активной области. В соответствии с используемым фотошаблоном расстояние сток-исток составляет 3 мкм, по данным измерения профиля ≈ 3 мкм. Ширина области первой корректировки (области травления) по фотошаблону составляет 1,4 мкм и располагается симметрично между стоком и истоком.

По данным измерения профиля ширина области корректировки составляет $\approx 1,6$ мкм и смещена к одному из омических контактов. В этой области на профиле наблюдается канавка глубиной 80...95 нм. Глубина канавки относительно поверхности металлизации составляет ≈ 280 ...300 нм. На рис.3б приведено изображение асимметричной канавки, образующейся у одной из стенок при травлении активной области. Глубина канавки на вставке ≈ 40 ...45 нм, ширина — 160...165 нм.

По данным АСМ толщина металлизации омического контакта составляет ≈ 170 нм (по заданию на

этапе напыления исходя из скорости и времени процесса 190 нм).

Ступень высотой 80...95 нм представляет собой несколько слоев: контактный слой n^+ -GaAs, а также часть барьерного слоя n -Al_xGa_{1-x}As, суммарная теоретическая толщина которых составляет ≈ 110 нм. Можно предположить, что при первой корректировке происходило травление контактного слоя n^+ -GaAs и части барьерного слоя n -Al_xGa_{1-x}As. Формирование канавки (вставка на рис.4) глубиной 40...45 нм связано с травлением слоев Al_xGa_{1-x}As (барьерного, сильнолегированного и спейсера суммарной теоретической толщиной 40 нм до материала канала — In_yGa_{1-y}As). Возможная причина — повышенная дефектность на интерфейсах и границе фоторезистивной маски, а следовательно, более высокая скорость химического травления такой области.

Таким образом, для контроля геометрии активной области и качества обрабатываемых поверхностей возможно использование методов АСМ в комбинации с методами химического травления. В качестве контролируемых объектов принимаются степень дефектности поверхностей (количество дефектов и величина рельефа), а также глубина и ширина профиля травления.

На основе технологии смещения затвора в сторону истока $L_s < L_d$ (рис.1) были получены транзисторы с пробивными напряжениями $U_{проб\ зс} \approx 6$ В, $U_{проб\ зи} \approx 4$ В. При этом наблюдается уменьшение паразитного сопротивления в цепи истока на величину до 20%. Как видим, управление геометрией размещения за-

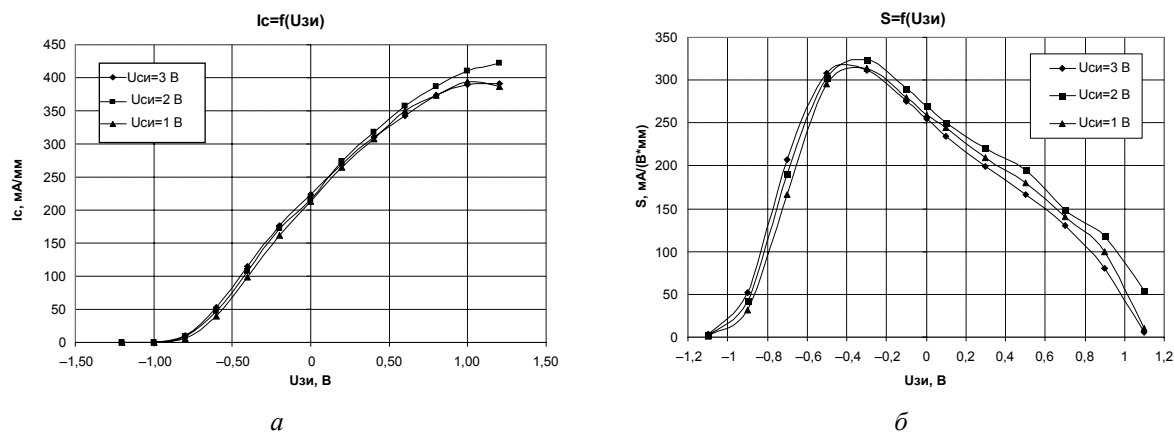


Рис.5. Зависимость удельного тока стока I_c (а) и крутизны S (б) от напряжения затвор-исток $U_{зи}$

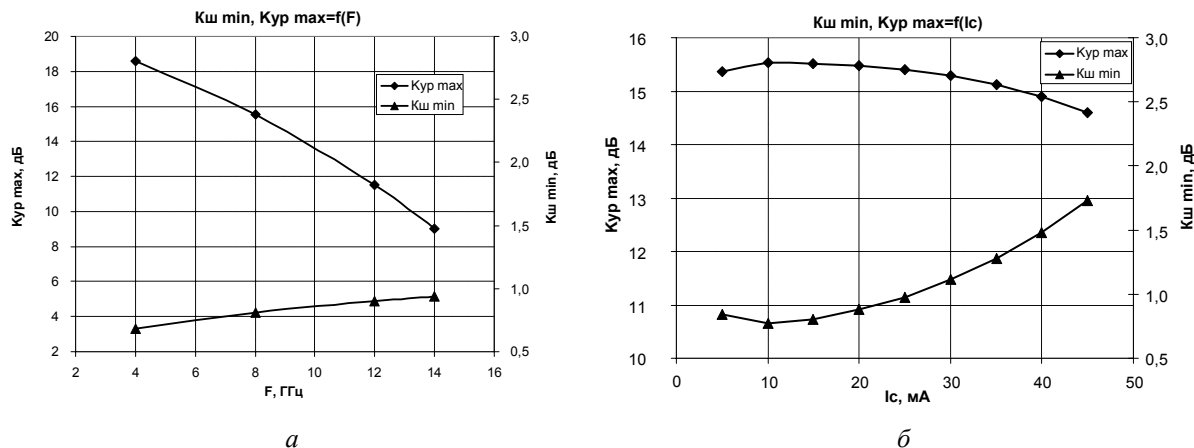


Рис.6. Зависимость минимального коэффициента шума $K_{ш\ min}$ и максимального коэффициента усиления $K_{уп\ max}$ от частоты F (а) и тока стока I_c (б)

твора в активной области позволяет улучшить параметры прибора.

На основе проведенных исследований влияния конструкции рНЕМТ структуры и активной области на параметры прибора были изготовлены транзисторы с шириной затвора 240 мкм, параметры которых представлены на рис.5 и 6.

Проведенные исследования показывают, что, изменяя параметры исходного материала, конструкцию активной области транзистора и управляя отдельными технологическими операциями (в первую очередь травлением активной области), можно существенным образом управлять параметрами готового прибора. Полученные в рамках данного исследования результаты и их оптимизация используются в настоящее время на предприятии ЗАО «НПП «Планета-Аргал» при из-

готовлении малошумящих рНЕМТ транзисторов, используемых как в виде дискретных приборов, так и в виде активных навесных элементов при изготовлении усилительных модулей СВЧ диапазона.

1. Федотов Я.А., Щука А.А. Транзисторы СВЧ-диапазона. 2000 — http://w-rabbit.narod.ru/elektr/tranz_s.htm
2. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 80 с.
3. Козловский Э.Ю., Спивак Ю.М., Мошников В.А., Пономарева А.А., Селезнев Б.И., Иванов Н.Н., Желаннов А.В. Транзисторные структуры типа рНЕМТ: исследование особенностей полупроводниковой гетероструктуры методами атомно-силовой микроскопии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. Вып.1. С.18-29.