

К. т. н. В. И. БОСЫЙ, А. В. ИВАЩУК, В. Н. КОВАЛЬЧУК,
к. ф.-м. н. Е. М. СЕМАШКО

Дата поступления в редакцию
04. 04 2003 г.

Украина, г. Киев, Научно-производственное предприятие «Сатурн»
E-mail: chmil@jssaturn.kiev.ua

Оппонент к. ф.-м. н. М. И. УГРИН
("Сатурн-Микро", г. Киев)

МОЩНЫЕ СВЧ-ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Представлен обзор опубликованных в последние годы результатов по созданию мощных СВЧ-транзисторов на основе гетероструктур AlGaIn/GaN.

Разработка и промышленный выпуск активных приборов с выходной мощностью в единицы ватт обеспечивают реальную возможность создания многоэлементных активных фазированных антенных решеток (АФАР) с использованием электронных методов сканирования для гибкого управления диаграммой направленности в пространстве. Весьма актуальным является вопрос повышения частотного диапазона, т. к. при фиксированных размерах антенны и времени обработки сигнала повышение разрешающей способности по угловым координатам и по скорости движения объекта возможно только с уменьшением длины волны.

В настоящее время широкое распространение получили устройства на основе полупроводниковых микросхем СВЧ — автогенератор, усилитель мощности, фазовращатель, смеситель и т. д., т. е. приемопередающие модули, подключаемые к каждому излучателю (или их группе) АФАР.

Одним из основных активных элементов современных АФАР являются мощные транзисторы. Такие транзисторы должны удовлетворять следующим требованиям:

- высокая удельная мощность и эффективность работы транзистора в заданном частотном диапазоне;
- расширенный температурный диапазон;
- высокая надежность;
- идентичность параметров.

В диапазоне частот свыше 10 ГГц наиболее широкое распространение получили полевые транзисторы на основе GaAs. Развитие технологии полевых транзисторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн идет по пути использования гетероэпитаксиальных многокомпонентных соединений A_3B_5 сложного состава. На таких структурах достигнуты рекордные параметры приборов с наименьшим коэффициентом шума ($K_{ш}$), наибольшим коэффициентом усиления по мощности ($K_{вп}$), а также с наибольшей рабочей частотой (f_p) [1].

Однако необходимо отметить, что параметры как арсенидгаллиевых, так и гетероструктурных транзисторов в настоящее время близки к теоретически возможным величинам, и для дальнейшего развития дан-

ного направления необходим поиск новых полупроводниковых материалов.

В последние годы во многих научно-исследовательских центрах мира ведутся интенсивные исследования возможности использования некоторых широкозонных полупроводников (в частности, SiC и GaN) для создания СВЧ-транзисторов высокой мощности. Наиболее перспективными приборами этой группы представляются транзисторы с повышенной подвижностью электронов (HEMT — High Electron Mobility Transistor) на основе AlGaIn/GaN. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлены данные, показывающие, как изменились значения удельной (а) и полной выходной (б) мощности СВЧ-транзисторов на основе AlGaIn/GaN за последние 6 лет [2].

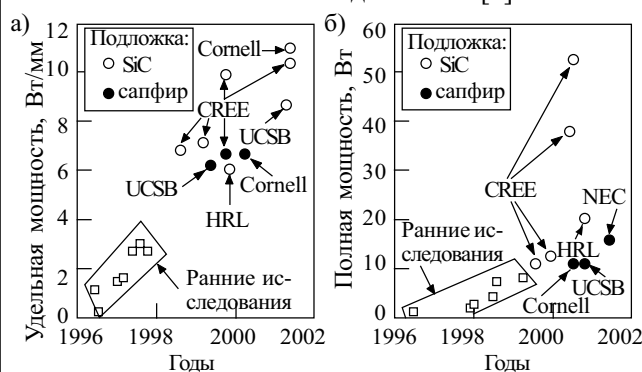


Рис. 1. Изменения параметров AlGaIn/GaN HEMT с 1996 по 2002 гг.:

а — удельная мощность; б — полная мощность

В данном обзоре, составленном на основе опубликованных в последние годы работ, рассмотрены некоторые основные свойства широкозонных полупроводников, вопросы конструирования и изготовления, а также результаты измерения параметров мощных HEMT на основе GaN, изготовленных на различных подложках (сапфире, SiC, нитриде галлия).

Свойства некоторых широкозонных полупроводников

Наиболее важными свойствами материалов, предназначенных для изготовления мощных СВЧ-транзисторов, являются ширина запрещенной зоны и связанная с ней критическая напряженность электрического поля, теплопроводность полупроводника, подвижность носителей заряда, скорость электронов в сильных электрических полях. Влияние скорости

Основные физические параметры полупроводниковых материалов

Полупроводник	Ширина запрещенной зоны, эВ	Теплопроводность, Вт/(см·К)	Подвижность электронов, см ² /(В·с)	Подвижность дырок, см ² /(В·с)	Диэлектрическая проницаемость	Критическая напряженность поля, МВ/см
Si	1,12	1,3	1350	480	11,7	0,3
GaAs	1,41	0,55	8500	400	12,9	0,4
SiC	3,0	4,9	400	<90	9,66	3—5
GaN	3,39	1,3	1000	<200	8,9	5

насыщения электронов особенно важно при увеличении рабочей частоты, когда с уменьшением размеров активной области возрастает роль баллистических эффектов [3, 4]. В таблице приведены некоторые основные физические параметры GaAs, SiC, GaN и Si. На рис. 2 представлены зависимости скорости электронов от напряженности электрического поля для этих же материалов [5]. Приведенные данные показывают, что GaN, обладающий наиболее широкой запрещенной зоной, высокой критической напряженностью электрического поля и относительно высокой теплопроводностью, а также максимальной скоростью электронов, представляется одним из наиболее перспективных материалов для создания мощных транзисторов.

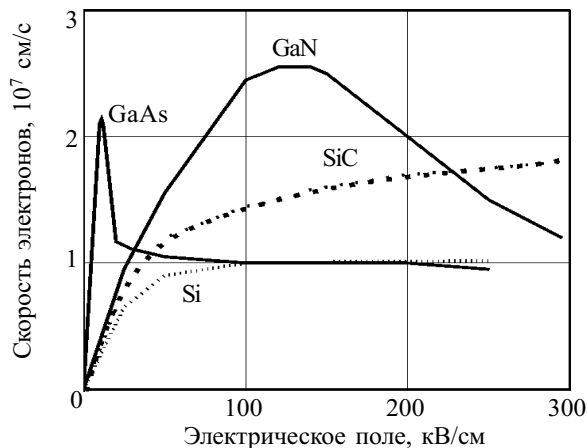


Рис. 2. Влияние напряженности электрического поля на скорость электронов в полупроводниковых материалах

Наиболее высокие удельные мощности в диапазоне частот 10 ГГц и выше получены при исследовании НЕМТ на основе AlGaN/GaN [6—8]. Это обусловлено такими свойствами материала как широкая запрещенная зона (3,4 эВ для GaN и 6,2 эВ для AlN, что позволяет получать высокие критические напряженности электрического поля — $(1...3) \cdot 10^6$ В/см), высокая скорость насыщения электронов ($2,2 \cdot 10^7$ см/с). Поверхностная концентрация носителей в области двумерного газа для таких структур составляет $\geq 1 \cdot 10^{13}$ см⁻², что на порядок выше, чем для структур типа AlGaAs/GaAs.

Основные работы в этом направлении ведутся в области разработки технологии выращивания и исследования параметров гетероструктур, влияния свойств подложки, изучения процессов переноса в таких системах, влияния различных физико-химических процессов на захват носителей и т. д.

Конструкция и технология изготовления транзисторов на основе гетероструктур AlGaN/GaN

На рис. 3 показана наиболее простая структура НЕМТ AlGaN/GaN [2]. В качестве подложки используют сапфир, SiC, Si, это может быть также AlN, или сложные окислы. Эпитаксиальные слои могут быть выращены методами молекулярно-лучевой эпитаксии, химического осаждения металлоорганических соединений из паровой фазы или газовой эпитаксии. Одним из наиболее важных моментов в создании гетероструктур является выращивание буферного слоя. При использовании в качестве подложки сапфира буферный слой (GaN или AlN) выращивается при относительно низкой (обычно ~600°C) температуре, затем подложка нагревается до температуры, необходимой для выращивания основного слоя [9]. Слои GaN и AlGaN обычно выращивают при температуре 1000°C со скоростью ~1 мкм/ч. В качестве буферного слоя на подложках карбида кремния обычно используют слой AlN, выращенный при температуре 900°C [10].

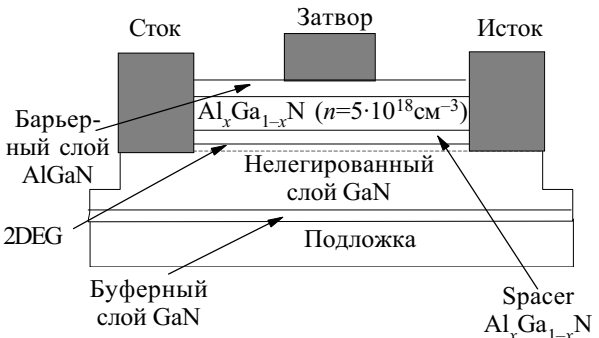


Рис. 3. Схематическое изображение НЕМТ AlGaN/GaN

Эпитаксиальная структура содержит буферный слой GaN толщиной ~100 нм, нелегированный слой GaN толщиной ~2 мкм, нелегированный разделительный слой (спейсер) Al_xGa_{1-x}N толщиной ~5 нм, легированный кремнием слой Al_xGa_{1-x}N с концентрацией носителей заряда $\sim 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ толщиной ~10 нм и нелегированный барьерный слой Al_xGa_{1-x}N толщиной ~10 нм [11]. Мольная доля Al в тройном соединении может быть в пределах 0,25—0,3. Подвижность носителей заряда в таких структурах, измеренная холловским методом при комнатной температуре, составляет 1100—1300 см²/(В·с), поверхностная концентрация электронов — $(1...2) \cdot 10^{13}$ см⁻².

Изготовление НЕМТ AlGaN/GaN начинается с формирования активной области прибора. Для этого может быть использовано либо мезатравление в плазме Cl₂/Ar [11, 12], либо ионная имплантация [13].

Параметры и надежность приборов на основе GaN, особенно работающих в широком температурном диапазоне, во многом определяются качеством контактов. Формирование омических контактов включает частичное про травливание слоя AlGaN в областях истока и стока, осаждение металла и отжиг структуры. Для создания омических контактов используют композицию Ti/Al/Ni/Au (200/2000/500/400 Å) с последующим отжигом при температуре 850—900°C в

течение 30 с [14]. Такая технология позволяет получить омические контакты с удельным сопротивлением $7,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² и результирующее сопротивление контакта 0,2—0,3 Ом·мм для транзистора AlGaIn/GaN, что сравнимо со значениями сопротивлений для транзисторов на GaAs. Омические контакты с низким удельным сопротивлением ($8,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·см²) были сформированы напылением Ti/Al с последующим быстрым термическим отжигом [4]. Омические контакты с хорошей морфологией могут быть также получены на основе Ta [15].

В качестве металлизации затвора может быть использована система Ni/Au [11]. Были получены барьеры Шоттки Pt–n-GaN с коэффициентом идеальности <1,05. Однако более типичные значения коэффициента идеальности при исследовании барьерных контактов на n-GaN составляют 1,3 и выше при высоте потенциального барьера от 1,1 до 0,25 эВ [4].

Важное значение при изготовлении приборов имеет пассивация поверхности полупроводника. В качестве пассивирующего покрытия используют слой SiN толщиной ~1500 Å.

Параметры СВЧ-транзисторов на основе AlGaIn/GaN

Статические параметры НЕМТ AlGaIn/GaN рассмотрены в работе [16] для транзисторов с длиной затвора 0,18 мкм, шириной 100 мкм и расстоянием "сток — исток" ~3 мкм, изготовленных на сапфировой подложке. На рис. 4 показаны измеренные на пластине типичные ВАХ этих приборов. Напряжение на затворе изменяли от 1 до –5 В. Максимальный ток стока $I_c = 920$ мА/мм был получен при смещении на затворе 1 В и напряжении смещения на стоке 5 В. Транзистор полностью перекрывается при напряжении затвор-сток $U_{зс} = -5$ В (ток стока менее 1 мА/мм при напряжении сток-исток $U_{си} = 10$ В).

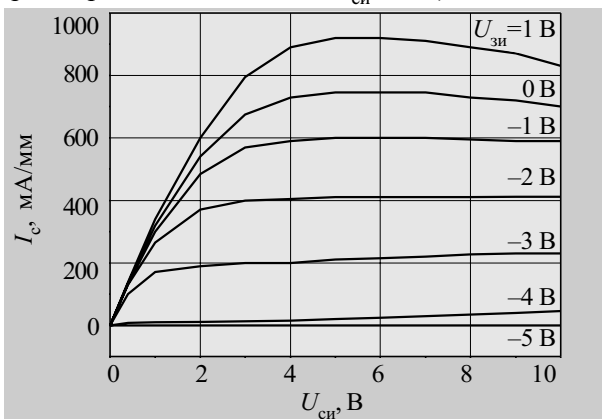


Рис 4. Вольт-амперные характеристики НЕМТ AlGaIn/GaN с длиной затвора 0,18 мкм и шириной 100 мкм

На рис. 5, а показаны передаточные характеристики для этого же транзистора. Напряжение сток-исток $U_{си} = 5$ В. Максимальная крутизна $g_m = 212$ мСм/мм была получена при $U_{зс} = -2,84$ В и $U_{зи} = 5$ В. Рис. 5, б иллюстрирует предпороговую зависимость тока стока от напряжения на затворе и свидетельствует о том, что затвор достаточно эффективно управляет потоком носителей в канале. Пороговое напряжение транзистора составляет –4,4 В.

На рис. 6 приведена вольт-амперная характеристика барьерного перехода при короткозамкнутом стоке и истоке для транзистора с шириной затвора 50 мкм. Для рассматриваемых приборов характерно отсутствие мягкого прогиба при обратном смещении вплоть до напряжения ~40 В, где ток утечки был не более 2,6 мкА. Напряжение отпирания барьерного перехода в прямом направлении составляет 2,76 В.

Существенное влияние как на статические, так и на динамические параметры транзисторов оказывает подложка. Как видно из рис. 4, при напряжении на затворе в диапазоне от 1 до 0 В происходит падение тока стока, начинающееся при напряжении сток-исток ~5 В, что авторы объясняют саморазогревом транзистора из-за относительно низкой теплопроводности сапфира. На рис. 7 сравниваются характеристики AlGaIn/GaN НЕМТ, изготовленных по идентичной технологии на подложках SiC, объемном GaN и сапфире [4]. Необходимо отметить, что крутизна транзисторов, изготовленных на SiC, обладающем наиболее высокой теплопроводностью, оказывается выше, чем на гомоэпитаксиальных структурах на основе GaN.

Исследования СВЧ-параметров НЕМТ AlGaIn/GaN подтверждают высокие возможности этих приборов, предсказанные теорией [17—19]. На рис. 8 показаны результаты измерений на пластине $P_{вых}$, $K_{УП}$, η и тока стока I_c транзистора с шириной затвора 300 мкм [2]. Была получена удельная мощность 10,3 Вт/мм при кпд 42%.

На рис. 9 представлены результаты измерений выходной мощности и кпд транзисторов в диапазоне смещений от 10 до 40 В; кпд составляет 56—62% в широком диапазоне напряжений. При напряжении смещения 40 В получена удельная мощность 8,3 Вт/мм и кпд 57%. Частота отсечки транзистора $f_T = 100$ ГГц, а $f_{макс} = 140$ ГГц [2]. Увеличение пробивного напряжения до 570 В было достигнуто при увеличении расстояния "сток—исток" до 13 мкм [14].

Авторами работы [20] на транзисторах с длиной затвора 0,12 мкм, изготовленных на подложке SiC, получены значения плотности тока 1,23 А/мм, максимальной крутизны — 314 мСм/мм, пробивного напряжения затвор-сток — более 60 В, частоты отсечки — 121 ГГц и максимальной частоты — 162 ГГц.

Высокая мощность на единицу ширины затвора позволяет уменьшать размеры приборов, что не только упрощает технологию изготовления, но и увеличивает импеданс (на порядок по сравнению с GaAs-приборами) и в результате улучшает согласование цепей. Кроме того, улучшаются условия теплоотвода.

Таким образом, НЕМТ на основе AlGaIn/GaN обладают существенными преимуществами перед аналогичными приборами на основе GaAs. Это, прежде всего, увеличение в 5—10 раз удельной мощности (≥ 10 Вт/мм), увеличение кпд (до ~60%), увеличение рабочей температуры перехода и повышение надежности приборов. Все это в целом снижает стоимость устройств.

Однако следует отметить, что высокие значения мощности часто достигаются при высокой компрессии усиления (5—9 дБ), что свидетельствует о высокой нелинейности. Кроме того, особенностью

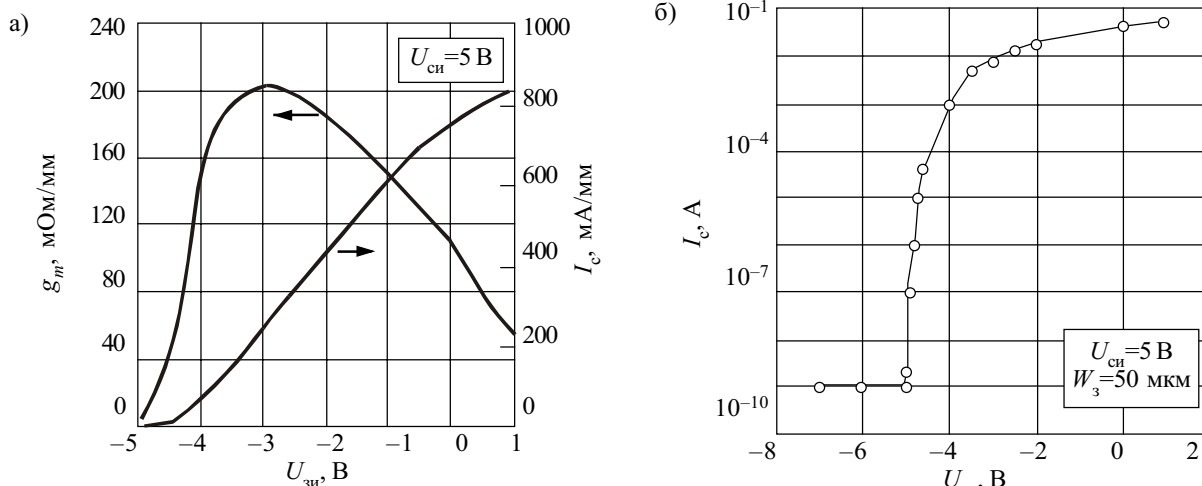


Рис. 5. Зависимости крутизны g_m и тока стока I_c от напряжения на затворе $U_{зи}$ (а) и предпороговая зависимость тока стока от напряжения на затворе (b) для НЕМТ AlGaIn/GaN с длиной затвора 0,18 мкм [16]

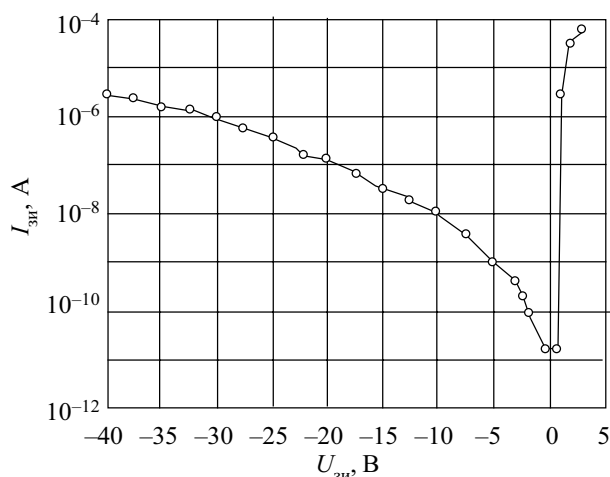


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика барьерного контакта НЕМТ AlGaIn/GaN с длиной затвора 0,12 мкм и шириной 50 мкм

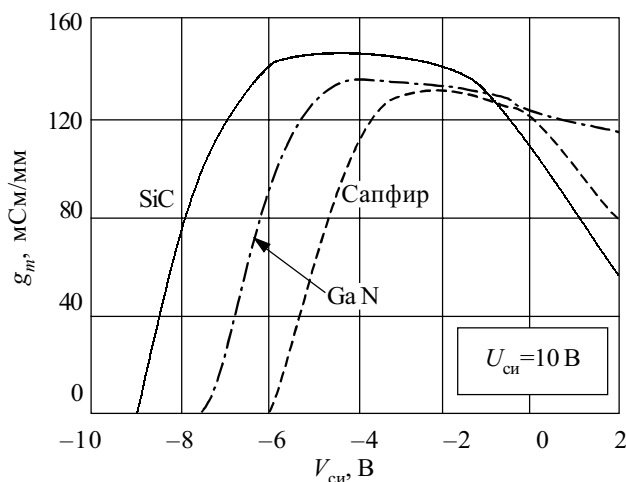


Рис. 7. Характеристики НЕМТ на основе GaN, изготовленных в идентичных условиях на подложках SiC, объемном GaN и сапфире

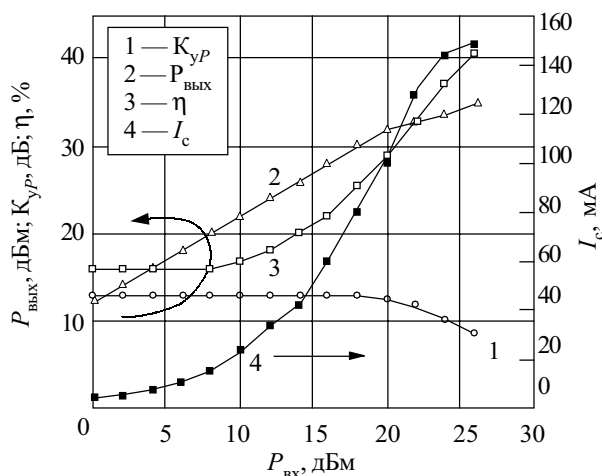


Рис. 8. Зависимость выходной мощности $P_{вых}$, коэффициента усиления по мощности K_{yp} , КПД η и тока стока I_c от входной мощности $P_{вх}$ для транзистора AlGaIn/GaN с длиной затвора 0,6 мкм и шириной 300 мкм

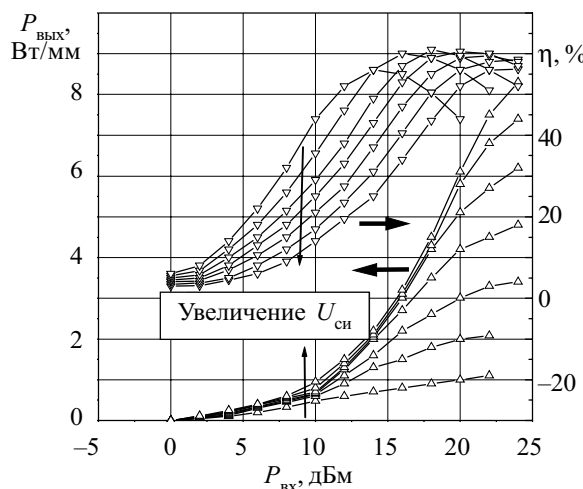


Рис. 9. Зависимости выходной мощности и КПД от входной мощности транзистора с длиной затвора 0,6 мкм и шириной 300 мкм при напряжениях сток-исток 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 В, измеренные на частоте 8 ГГц

НЕМТ на основе гетероструктур AlGaN/GaN является дисперсия вольт-амперных характеристик в режиме большого сигнала [2, 21]. В качестве примера на **рис. 10** показаны вольт-амперные характеристики транзистора до и после приложения большого напряжения к стоку [22]. При этом величина тока стока может быть восстановлена освещением прибора светом с длиной волны ~600 нм, соответствующей ширине запрещенной зоны GaN.

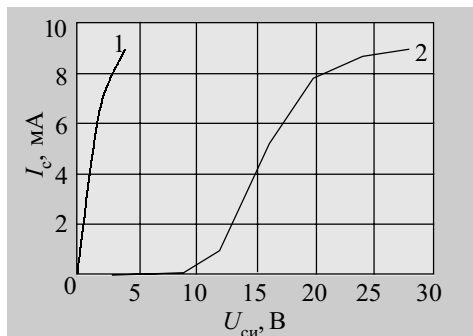


Рис. 10. Зависимость тока стока от напряжения сток-сток до (1) и после (2) приложения к стоку напряжения смещения 20 В для транзистора на основе AlGaN/GaN

Эти эффекты могут быть связаны со структурными особенностями полупроводниковых слоев, особенностями распределения заряда и процессов переноса носителей заряда в таких системах, электрически активными дефектами в полупроводниковых слоях и на границах раздела и т. п. В связи с этим значительное внимание уделяется исследованиям природы дефектов в слоях AlGaN/GaN и совершенствованию технологии выращивания эпитаксиальных структур.

Физические эффекты в гетероструктурах AlGaN/GaN и их влияние на параметры транзисторов

Одно из ограничений в гетероструктурах AlGaN/GaN связано со снижением концентрации носителей, обусловленным свойствами симметричной потенциальной ямы на границе раздела, из которой носители могут свободно переходить в буферный GaN- или барьерный AlGaN-слой. Это явление может приводить к увеличению низкочастотного шума, а также к снижению крутизны [4]. Кроме того, такие носители

могут быть захвачены ловушками, что приводит к замедлению переходных процессов и деградации токовых характеристик.

Влияние глубоких уровней на параметры полевых транзисторов на основе GaN описано в [23]. Показано, что на характеристики транзисторов оказывают влияние глубокие уровни в запрещенной зоне GaN. Следует отметить, что аналогичные эффекты наблюдались в структурах AlGaAs/GaAs. Формирование таких уровней связано с условиями роста эпитаксиального слоя. Для улучшения параметров эпитаксиальных слоев GaN и AlGaN в процессе роста в растущую пленку вводят индий. При этом улучшается морфология поверхности, повышается на 10—20% подвижность носителей заряда [20].

Одним из основных физических эффектов, определяющих поведение приборов и оказывающих влияние на плотность дефектов в полупроводниковой структуре, являются сильные пьезоэлектрические свойства и полярная природа поверхностей GaN и AlGaN [4]. Роль, которую играют в образовании дислокаций механические деформации, обусловленные различием в постоянных решеток слоев, иллюстрирует **рис. 11** [2]. Механические напряжения, вызванные ростом $Al_xGa_{1-x}N$ на GaN, приводят к пьезоэлектрической поляризации, которая складывается со спонтанной поляризацией, обусловленной кристаллической структурой слоев. В результате на границе раздела слоев $Al_xGa_{1-x}N$ и GaN накапливается заряд, оказывающий влияние на процессы переноса в такой структуре.

В работе [4] описан новый мощный AlGaN/InGaN/GaN двойной гетеропереходный полевой транзистор (DHFET). В такой структуре между буферным слоем GaN и барьерным слоем $Al_{0,25}Ga_{0,75}N$ располагается тонкий (50 Å) слой $In_{0,1}Ga_{0,9}N$, который в результате изменений в зонной структуре и формирования поляризационных зарядов на гетерогранице обеспечивает высокую концентрацию двумерных электронов в потенциальной яме.

В отличие от обычных приборов этого типа, электрическое поле в InGaN квантовой яме остается практически постоянным в широком диапазоне напряжений на затворе, т. к. определяющее влияние на свой-

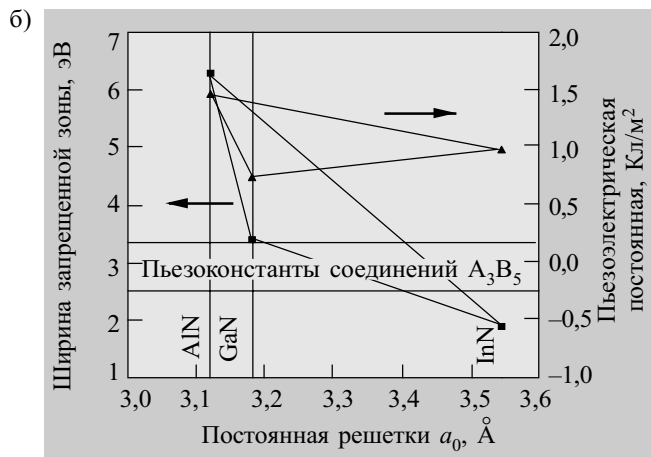
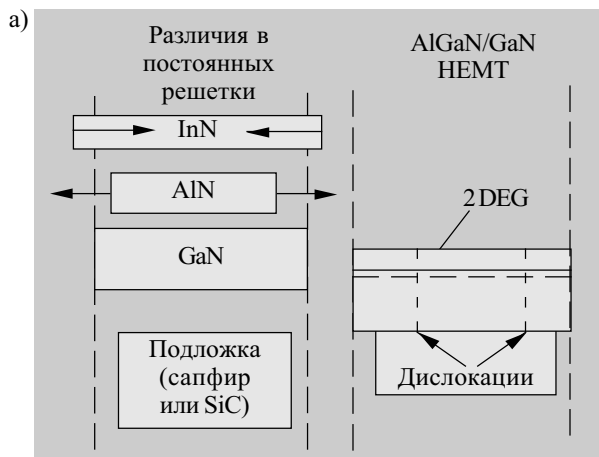


Рис. 11. Зонная диаграмма (а) и пьезоэлектрическая поляризация (б) в зависимости от постоянной решетки для (Al, Ga, In, N)-системы

ства гетерограницы оказывают поляризационные заряды. В DHFET в результате уменьшения рассогласования решеток механические напряжения в бислоистой AlGaIn/InGaIn-структуре на GaN-буфере близки к нулю при любых значениях напряжения на затворе. Следовательно, отсутствуют значительные изменения заряда, обусловленные деформациями, вызванными модуляцией напряжения на затворе. При этом, соответственно, уменьшается и дисперсия тока. Эти приборы показали выходную мощность 4,3 Вт/мм в непрерывном режиме и 6,3 Вт/мм в импульсном при компрессии усиления 4 дБ. При этом на характеристиках не наблюдался эффект деградации тока ни в импульсном, ни в непрерывном режиме.

Поскольку в приборах на основе GaN механические напряжения, пьезоэлектрические и пирозлектрические эффекты играют преобладающую роль, для достижения высоких параметров необходимо научиться управлять этими эффектами. Такое управление может быть достигнуто при использовании четверных соединений типа $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$ [4]. При соответствующем подборе параметров слоев можно частично или полностью компенсировать рассогласование решеток, что улучшает структурные, оптические и электрофизические свойства таких гетероструктур. Для улучшения качества гетероструктур возможно также использование сверхрешеток GaN/AlN/InN.

Таким образом, подбором расположения, толщины и состава слоев можно управлять электрофизическими параметрами эпитаксиальных структур и транзисторов. Несмотря на то, что данные работы носят пока только исследовательский характер, можно ожидать, что в ближайшее время появятся приборы с параметрами, предсказанными теоретически.

Выводы

Анализ опубликованных за последние годы результатов исследований показывает несомненную перспективность применения широкозонных полупроводниковых материалов для создания транзисторов высокой мощности. Основным типом таких приборов является НЕМТ на основе гетероструктур AlGaIn/GaN.

Несмотря на то, что технология изготовления эпитаксиальных структур для этих транзисторов еще находится в стадии лабораторных исследований, достигнутый уровень параметров транзисторов (удельной мощности ≥ 10 Вт/мм, КПД ~ 50 — 60%) в диапазоне частот до 10 ГГц и выше подтверждает перспективность их использования в современных системах АФАР.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Yamashita Y., Endoh A., Higashiwaki M. et al. High f_T 50-nm-gate InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors lattice-matched to InP substrates // *Jpn. J. Appl. Phys.*— 2000.— Vol. 39.— P. L838—L840.
2. Mishra U. K., Parikh P., Wu Y.-F. AlGaIn/GaN HEMTs—an overview of device operation and applications // *Proc. IEEE.*— 2002.— Vol. 90, N 6.— P. 1022—1031.
3. Eastman L. F., Mishra U. K. The toughest transistor yet // *IEEE Spectrum.*— 2002.— N. 5.— P. 28—33.
4. Shur M. S., Gaska R., Khan A., Simin G. Wide band gap electronic devices / Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices,

Circuits and Systems.— Aruba.— 2002, April 17—19.— P. D051-1—D051-8.

5. Shur M. S., Khan M. A. Wide band gap semiconductors. Good results and great expectations // *Proc. of 23d Internat. Sympos. on GaAs and Related Compounds.*— St. Petersburg, Russia, Sept. 22—28, 1996.— Institute Phys. Conference Series.— N 155, Chapter 2.— P. 25—32.

6. Wu Y. F., Kapolnek D., Ibbetson J. P. et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs // *IEEE Trans. Electron Dev.*— 2001.— Vol. 48, N 3.— P. 586—590.

7. Sheppard S. T., Doverspike K., Pribble W. L. et al. High power microwave GaN/AlGaIn HEMTs on silicon carbide // *IEEE Electron Dev. Letters.*— 1999.— Vol. 20, N 4.— P. 161—163.

8. Nguyen N. X., Micovic M., Wong W. S. et al. High performance microwave power GaN/AlGaIn MODFETs grown by RF-assisted MBE // *Electron Lett.*— 2000.— Vol. 36, Mar.— P. 468—469.

9. Amano H., Sawaki N., Akasaki I., Toyoda Y. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of high quality GaN film using an AlN buffer layer // *Appl. Phys. Lett.*— 1986.— Vol. 48, N 5.— P. 353—355.

10. Weeks T. W., Bremser M. D., Ailey K. S. et al. GaN thin films deposited via organometallic vapor phase epitaxy on alpha (6H)-SiC(0001) using high-temperature monocrySTALLINE AlN buffer layers // *Appl. Phys. Lett.*— 1995.— Vol. 67, N 7.— P. 401—403.

11. Kumar V., Lu W., Kiliev A. et al. AlGaIn/GaN HEMTs on SiC with f_T of over 120 GHz // *IEEE Electron Dev. Letters.*— 2002.— Vol. 23, N 8.— P. 455—547.

12. Pearton S. J., Zolper J. C., Shul R. J., Ren F. GaN: processing, defects and devices // *J. Appl. Phys.*— 1999.— Vol. 86, N 1.— P. 1—78.

13. Binari S. C., Dietrich H. B., Kelner G. et al. H, He, and N implant isolation of n-type GaN // *J. Appl. Phys.*— 1995.— Vol. 78, N 5.— P. 3008—3011.

14. Zhang N.-Q., Keller S., Parish G. et al. High breakdown GaN HEMT with overlapping gate structures // *IEEE Electron Dev. Letters.*— 2000.— Vol. 21, N 9.— P. 373—375.

15. Qiao D., Jia L., Yu L. S. et al. Ta-based interface ohmic contacts to AlGaIn/GaN heterostructures // *J. Appl. Phys.*— 2001.— Vol. 89, N 10.— P. 5543—5546.

16. Lu W., Kumar V., Schwindt R. et al. DC, RF and microwave noise performances of AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire substrates // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.*— 2002.— Vol. 50, N 11.— P. 2499—2504.

17. Keller S., Wu Y.-F., Parish G. et al. Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistor: process development and present status at UCSB // *IEEE Trans. Electron Devices.*— 2001.— Vol. 48, N 3.— P. 552—559.

18. Sheppard S. T., Doverspike K., Pribble W. L. et al. High power microwave GaN/AlGaIn HEMTs on silicon carbide // *IEEE Electron Device Lett.*— 1999.— Vol. 20, N 4.— P. 161—163.

19. Wu Y.-F., Kapolnek D., Ibbetson J. P. et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs // *IEEE Trans. Electron Devices.*— 2001.— Vol. 48, N 3.— P. 586—590.

20. Kumar V., Lu W., Schwindt R. et al. AlGaIn/GaN HEMTs on SiC with f_T of over 120 GHz // *IEEE Electron Dev. Letters.*— 2002.— Vol. 23, N 8.— P. 455—457.

21. Binari S. C., Klein P. V., Kazior T. E. Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs // *Proc. IEEE.*— 2002.— Vol. 90, N 6.— P. 1048—1058.

22. Khan M. A., Shur M. S., Chen Q. C., Kuznia J. N. Current/voltage characteristic collapse in AlGaIn/GaN heterostructure insulated gate field effect transistors at high drain bias // *Electron. Lett.*— 1994.— Vol. 30, N 25.— P. 2175—2176.

23. Binari S. C., Kruppa W., Dietrich H. B. et al. Fabrication and characterization of GaN FETs // *Solid-State Electron.*— 1997.— Vol. 41, N 10.— P. 1549—1554.