

ШИРОКОЗОННЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ (Al,Ga,In)N И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Ю.Федоров yuraf2002@mail.ru

Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН

Полупроводниковые приборы на основе широкозонных соединений нитридов достаточно давно привлекают внимание разработчиков всего мира. Действительно, приборы на основе GaN-гетероструктур обещали уникальное сочетание мощностных и частотных характеристик. И эти надежды отчасти начали сбываться – GaN-транзисторы и монолитные интегральные схемы на их основе уже производятся серийно. Но камнем преткновения оставались высокие частоты, прежде всего – в миллиметровом диапазоне длин волн. Однако в последние годы, судя по многочисленным публикациям, и эта проблема преодолена. И вскоре ведущие мировые производители приступят к производству СВЧ-приборов на основе широкозонных гетероструктур (Al,Ga,In)N для работы в миллиметровом диапазоне. По сути, это означает новую эру в полупроводниковой СВЧ-электронике, поскольку открывает поистине фантастические возможности.

Транзисторы на основе широкозонных гетероструктур AlGaIn/GaN (HEMT) чрезвычайно привлекательны для применения в мощных передающих СВЧ-устройствах ввиду их очевидных преимуществ перед узкозонными полупроводниками (табл.1). Это было убедительно продемонстрировано в предыдущие годы на примерах усилителей мощности L-, S- и X-диапазонов (рис.1). Основное преимущество AlGaIn/GaN HEMT – высокая удельная мощность (>10 Вт/мм в X-диапазоне [1]), что позволяет существенно упростить топологию монолитных интегральных схем (МИС) усилителей мощности, повысить эффективность и массо-габаритные параметры.

Проанализируем развитие работ в мире в данной области за последние годы с акцентом на совершенствовании гетероструктур и технологии.

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ ДВУМЕРНОГО ГАЗА В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ (Al, Ga, In)N

Физический эффект, который определяет формирование двумерного электронного газа (2DEG) на границе раздела гетероструктур на основе соединений (Al, Ga, In)N, – их полярная природа. Все выращенные высококачественные полупроводники такого состава оказываются полярными в результате спонтанной поляризации P_{sp} . Кроме того, из-за несоответствия периодов кристаллических решеток на границах раздела гетероструктур возникают тангенциальные напряжения, которые приводят к дополнительной пьезоэлектрической поляризации P_{zp} (рис.2).

В гетероструктурах AlGaIn/GaN полярная природа GaN и AlGaIn приводит к их спонтанной поляризации P_{sp} уже в процессе роста. Кроме того, из-за тангенциальных растягивающих напряжений на границе раздела $Al_xGa_{(1-x)}N/GaN$ до-

Таблица 1. Сравнительная характеристика некоторых полупроводниковых материалов.

Материал	Подвижность, см ² /(В·с)	Диэлектрическая проницаемость	Ширина запрещенной зоны, эВ	BFOM* относительно BFOM Si	JFOM** относительно JFOM Si	Максимальная рабочая температура, °С
Si	1300	11,4	1,1	1,0	1,0	300
GaAs	5000	13,1	1,4	9,6	3,5	300
SiC	260	9,7	2,9	3,1	60	600
GaN	1500	9,5	3,4	24,6	80	700

* BFOM – критерий Балига (Baliga's figure of merit) $BFOM = \epsilon \cdot \mu \cdot E_g^3$, где ϵ – диэлектрическая постоянная полупроводника, μ – подвижность носителей, E_g – ширина запрещенной зоны.

** JFOM – критерий Джонсона (Johnson's figure of merit) $JFOM = E_b \cdot v_{sat} / 2\pi = 2F_t U_b / \alpha$, где E_b и U_b – напряженность поля пробоя в канале и напряжение пробоя, v_{sat} – скорость насыщения носителей в канале, F_t – частота отсечки по току, α – безразмерный коэффициент.

полнительно возникает пьезоэлектрическая поляризация P_{pz} . В итоге генерация положительных зарядов на границе раздела $Al_xGa_{(1-x)}N/GaN$ (рис.3) может быть представлена выражением:

$$P(x) = P_{zp} + P_{sp} = -[(3,2x - 1,9x^2) \cdot 10^{-6} - 5,2 \cdot 10^{-6}x] \text{ [Кл/см}^2\text{]}. \quad (1)$$

В гетероструктурах InGaN/GaN, напротив, при выращивании слоя $In_xGa_{(1-x)}N/GaN$ возникают сжимающие напряжения, которые приводят к генерации зарядов противоположного знака (рис.4), концентрация которых определяется выражением:

$$P(x) = P_{zp} + P_{sp} = (14,1x + 4,9x^2) \cdot 10^{-6} - 0,3 \cdot 10^{-6}x \text{ [Кл/см}^2\text{]}. \quad (2)$$

Таким образом, комбинируя элементы Al, Ga и In в соединении с N в процессе роста гетероструктур $(Al,Ga,In)N/GaN$ и формируя таким образом слои с различным составом и свойствами, можно управлять концентрацией образующегося двумерного электронного газа на границе раздела с самым узкозонным материалом – обычно это GaN. Такой подход открывает широкие возможности для конструирования и оптимизации гетероструктур под конкретные прикладные задачи.

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ AlGaN/GaN (ТИП I)

Гетероструктуры AlGaN/GaN наиболее просты для эпитаксиального роста, поэтому их освоили в первую очередь (рис.5). Величина разрыва зон ΔE_c для типичных гетероструктур состава $Al_{0,3}Ga_{0,7}N/GaN$ составляет

~0,6 эВ. При этом концентрацию электронов n_s двумерного электронного газа (2DEG) можно оценить как [2]:

$$n_s = \frac{\sigma_{AlGaN} \cdot t_{AlGaN} - \frac{\epsilon \epsilon_0}{q} \Phi_B + \frac{\epsilon \epsilon_0}{q^2} \Delta E_{c,AlGaN}}{t_{AlGaN} + d_0}, \quad (3)$$

где t_{AlGaN} – толщина барьерного слоя, d_0 – расстояние от гетерограницы до центроида двумерного газа, σ_{AlGaN} – поверхностная плотность поляризационных зарядов на границе раздела (равна $P(x)$ в формуле (1)), Φ_B – потенциал на поверхности (зависит от напряжения на затворе).

Приведенное выражение показывает способность работы транзистора – изменение напряжения на затворе приводит к управлению концентрацией электронов в канале транзистора.

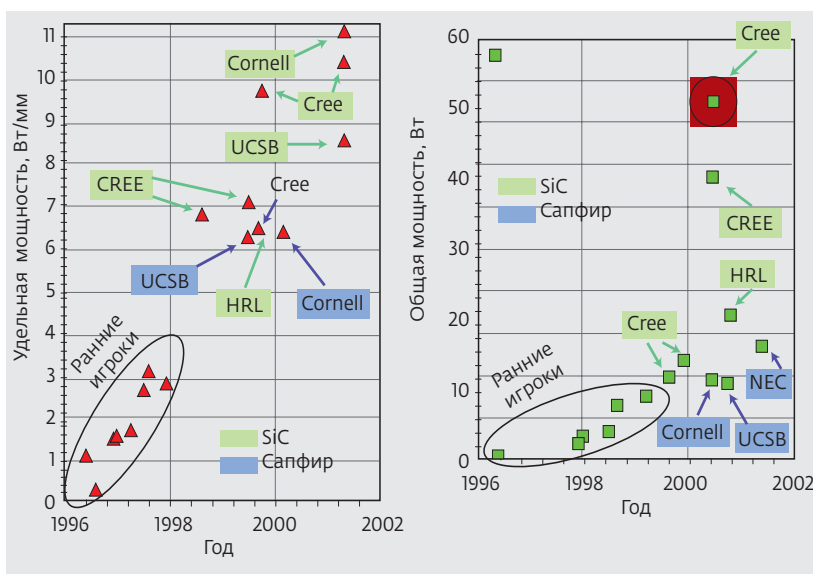


Рис.1. Динамика развития мощных приборов на основе AlGaN/GaN HEMT [1]

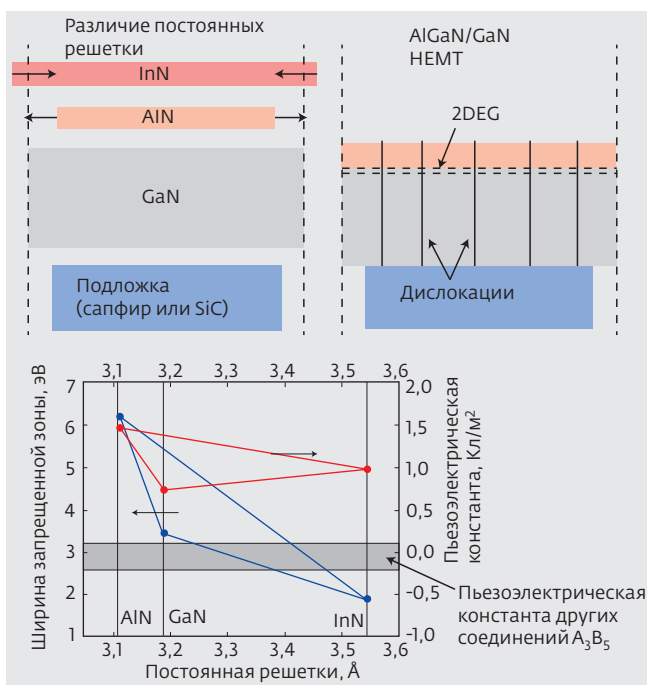


Рис.2. Направления тангенциальных напряжений и характеристики пьезоэлектрической поляризации на гетерограницах AlN/GaN и InN/GaN

К сожалению, нет подложек, точно согласованных по периоду решетки с GaN, поэтому необходимо выращивать сложные по составу переходные слои, качество которых во многом определяет параметры дальнейшей структуры, ее дефектность и свойства электронного газа. Как правило, переходные слои содержат один или несколько низкотемпературных прослоек AlN, выращиваемых на зародышевом слое GaN, для уменьшения дефектности последующего буферного слоя GaN [3].

Вариации параметров гетероструктур типа AlGaN/GaN сводятся в основном к вариациям толщины барьерного слоя и содержания в нем Al. Как правило, мольная доля Al изменяется от 0,24 до 0,35, а толщина – в пределах 20–27 нм (табл.2). Концентрация электронов 2DEG составляет $(0,9-1,1) \cdot 10^{13}$ см⁻² при подвижности около 1500 см²/В·с. Не усложняя существенно ростовой процесс, простую ге-

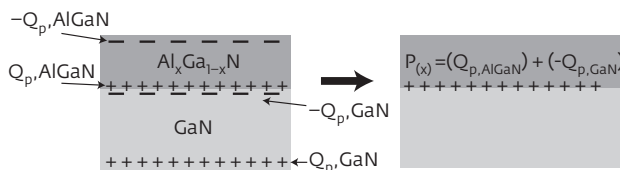


Рис.3. Принцип образования индуцированного заряда на границе раздела AlGaN/GaN

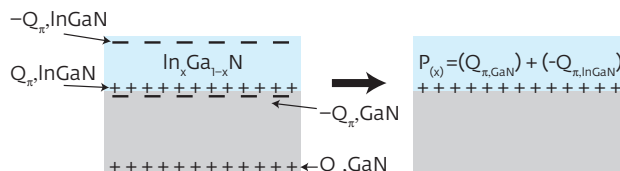


Рис.4. Принцип образования индуцированного заряда на границе раздела InGaN/GaN

тероструктуру можно улучшить, формируя слой GaN (легированный или нелегированный) толщиной порядка 2 нм для улучшения контактного сопротивления [8, 10]. Эффективно и легирование части барьерного слоя кремнием ($N_{Si} = (0,5-5) \cdot 10^{19}$ см⁻³) [11] для повышения концентрации электронов в канале (в частности, за счет снижения напряжений из-за рассогласования решеток AlGaN/GaN). Выращиванию подобных гетероструктур, изготовлению и исследованию приборов на их основе посвящено множество работ. Некоторые из полученных в последние годы ре-

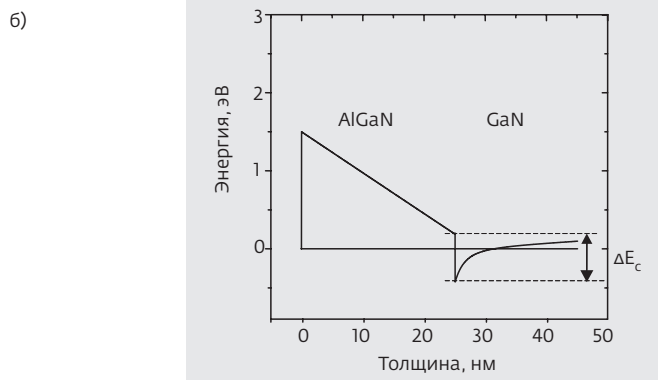
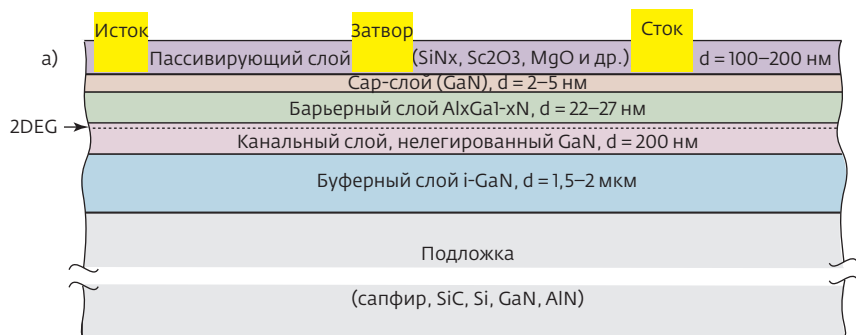


Рис.5. Базовая структура HEMT AlGaN/GaN (а) и его зонная диаграмма (б) [1]

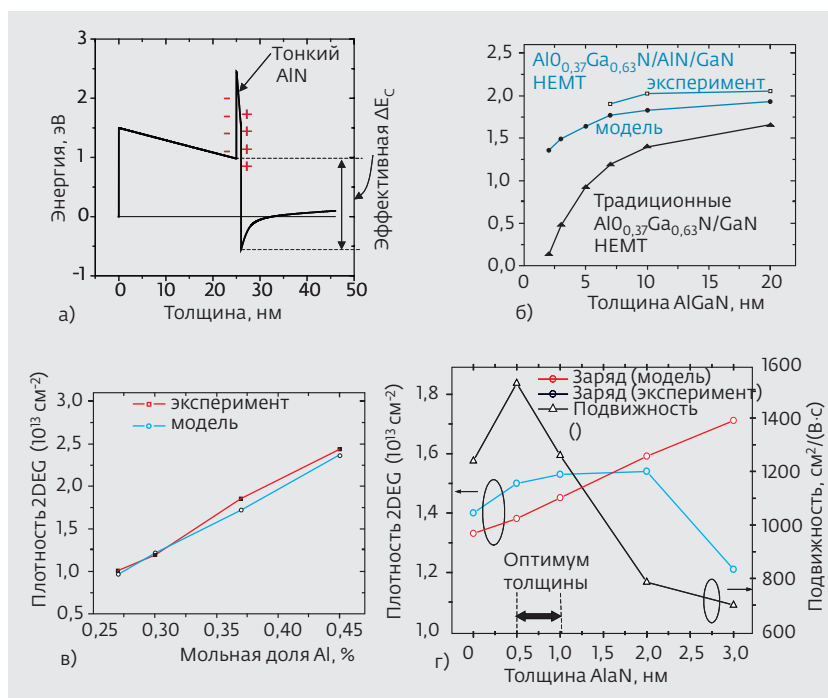


Рис.6. Зонная диаграмма гетероструктуры $Al_xGa_{(1-x)}N/AlN/GaN$ (а) и зависимость параметров 2DEG от толщин и состава ее слоев: б – зависимость концентрации 2DEG от содержания Al в барьерном слое $Al_xGa_{(1-x)}N$; в – от толщины барьерного слоя $Al_{0,37}Ga_{0,63}N$; г – зависимость концентрации и подвижности 2DEG от толщины слоя AlN

зультатов, имеющие отношение к КВЧ-диапазону, приведены в табл.2.

Обращает внимание сравнительно невысокая крутизна транзисторов (100–240 мСм/мм) и низкое усиление в КВЧ-диапазоне, несмотря на достаточно высокие значения F_t и F_{max} (в диапазоне частот 30–40 ГГц максимально возможное усиление ($MaxGain$) **изменяется примерно от 8 до 4,5 дБ** [12]). Видимо поэтому большинство работ с такими гетероструктурами ограничивается созданием и исследованием приборов в диапазоне частот до 10 ГГц, где достигнуты очень высокие параметры транзисторов и МИС усилителей мощности (см., например, [13]), а также решением проблемы ловушек на гетерограницах (задержка времени включения транзисторов, **lag-эффект**) [4].

Особняком стоят работы [5, 9], где получены впечатляющие параметры (см. табл.2) транзисторов на частотах 20, 30 и 35 ГГц – так, крутизна транзисторов увеличена до 285 [5] и 275 мСм/мм [9]. Детали технологии и состава гетероструктур, способствовавшие повышению крутизны, не сообщаются, возможно, использовалась техника заглубления затвора с помощью плазмохимического травления подзатворной канавки в барьере AlGaIn.

Однако дальнейшее повышение рабочих частот НЕМТ на традиционных гетероструктурах невозможно из-за короткоканальных эффектов. В работе [14] было показано, что для предотвращения короткоканальных эффектов в AlGaIn/GaN НЕМТ требуется выдержать соотношение длины канала L_g к толщине барьерного слоя $L_g/t_{AlGaIn} > 15$. Это требование в три раза более жесткое, чем в случае рНЕМТ на GaAs ($L_g/t_{AlGaAs} > 5$). С другой стороны, при $t_{AlGaIn} < 15$ нм происходит резкое снижение концентрации 2DEG [15] (см., например, рис.6б). Следовательно, для предотвращения короткоканальных эффектов в обычных гетероструктурах AlGaIn/GaN с $t_{AlGaIn} = 15$ нм длина затвора должна быть больше 225 нм. В реальности – еще больше, поскольку на практике, как видно из табл.2, толщина барьера находится в диапазоне 20–27 нм.

Из сказанного следует, что НЕМТ на традиционных гетероструктурах AlGaIn/GaN не могут быть использованы для создания эффективных приборов миллиметрового диапазона длин волн. Для преодоления данного ограничения были предложены новые типы гетероструктур.

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ AlGaIn/AlN/GaN (ТИП II)

Дальнейший прогресс в развитии гетероструктур (Al,Ga)N связан с **введением тонкого барьера AlN** между каналом GaN и барьерным слоем AlGaIn (рис.6). Влияние такой модификации гетероструктуры было подробно исследовано в работе [16] (см. также [2, 17–19]). Было показано, что сильный поляризационный эффект от введения барьерной прослойки AlN толщиной не более 3,5 нм приводит к возрастанию концентрации электронов 2DEG до $n_s = 3,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что сопровождается снижением слоевого сопротивления гетероструктуры до 180 Ом/□. Это является результатом не только повышения концентрации n_s , но и значительного повышения подвижности электронов μ_e до 2200 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Однако дальнейшее выращивание контактного слоя GaN над барьерным слоем AlN/GaN приводит к значительному снижению n_s [2]. В результате исследований была найдена компромис-

сная гетероструктура вида $Al_{0,37}Ga_{0,63}N/AlN/GaN$ с толщиной прослойки AlN всего 1 нм, у которой $n_s = 2,15 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\mu_e = 1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $R = 194 \text{ Ом}/\square$. Параметры оптимальной гетероструктуры с прослойкой AlN значительно превосходят параметры обычных гетероструктур. В частности, для гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN **возрастает концентрация электронов n_s 2DEG** по сравнению с обычной гетероструктурой:

$$n_s = \frac{\sigma_{AlGaIn} \cdot t_{AlGaIn} + \sigma_{AlN} \cdot t_{AlN} - \frac{\epsilon \epsilon_0}{q} (\phi_B - \frac{\Delta E_{C,AlGaIn}}{q})}{t_{AlGaIn} + t_{AlN} + d_0} \quad (4)$$

Графически основные закономерности формирования 2DEG в гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN показаны на рис.6 [2]. В дальнейшем подобные исследования были повторены во многих работах (например, [20]) и легли в основу создания нового стандарта гетероструктур более совершенных приборов, быстро освоенных промышленностью, в том числе – миллиметрового диапазона длин волн. В качестве примера приведем НЕМТ-структуру компании Cree – одного из мировых лидеров в разработке и производстве приборов миллиметрового диапазона на широкозонных полупроводниках AlGaIn/GaN (рис.7).

Другой пример – AlGaIn/AlN/GaN НЕМТ миллиметрового диапазона, с рекордными параметрами, представленный фирмой NORTHROP GRUMMAN (США) на RFIC-симпозиуме 4 июня 2007 года (рис.8) [21]. Транзисторы состоят из восьми секций по 62,5 мкм (ширина $W_g = 500 \text{ мкм}$), длина затворов – $L_g = 0,2 \text{ мкм}$. Удельная выходная мощность достигает 4,2 Вт/мм (при PAE 36,7% и $K_p = 8,3 \text{ дБ}$) и даже 5 Вт/мм (при PAE 43,7% и $K_p = 7 \text{ дБ}$) в зависимости от режима работы транзистора.

Кроме того, достигнуты частотные параметры AlGaIn/AlN/GaN НЕМТ, превосходящие рекордные параметры рНЕМТ на GaAs (рис.9), а именно $F_t = 163 \text{ ГГц}$, $F_{max} = 185 \text{ ГГц}$.

В табл.3 представлены результаты некоторых работ, в которых были применены гетероструктуры с прослойкой AlN (1 нм), в том числе и на подложках из синтетического алмаза и кремния [24]. Видно, что введение AlN в первую очередь привело к существенному возрастанию крутизны транзисторов вплоть до 501 мСм/мм (!) [25], начального (максимального) тока транзисторов до 1000 (1200) мА/мм при одновременном уменьшении напряжения отсечки до -2...-3 В. Другими словами, тонкий барьер AlN (1 нм) позволил снизить толщину барьерного слоя AlGaIn, тем самым сократив расстояние от затвора до канала НЕМТ, что и привело к повышению

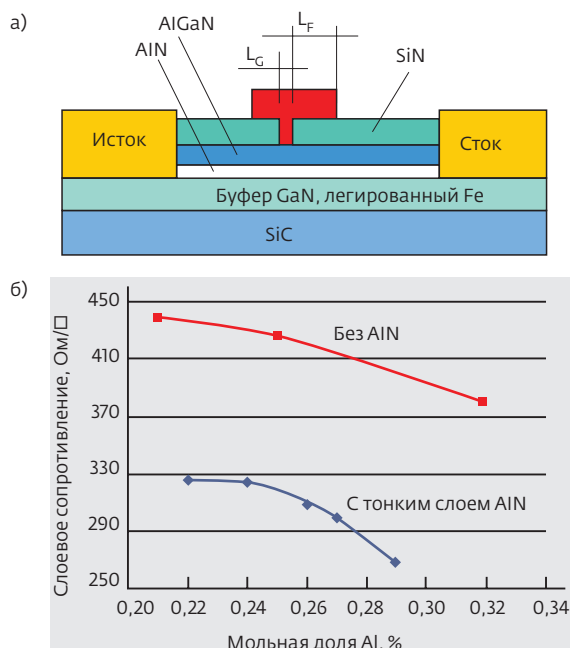


Рис.7. Структура $Al_xGa_{(1-x)}N/AlN/GaN/SiC$ НЕМТ фирмы Cree (а) и влияние прослойки AlN на его параметры в зависимости от мольной доли X_{Al} в барьерном слое (б)

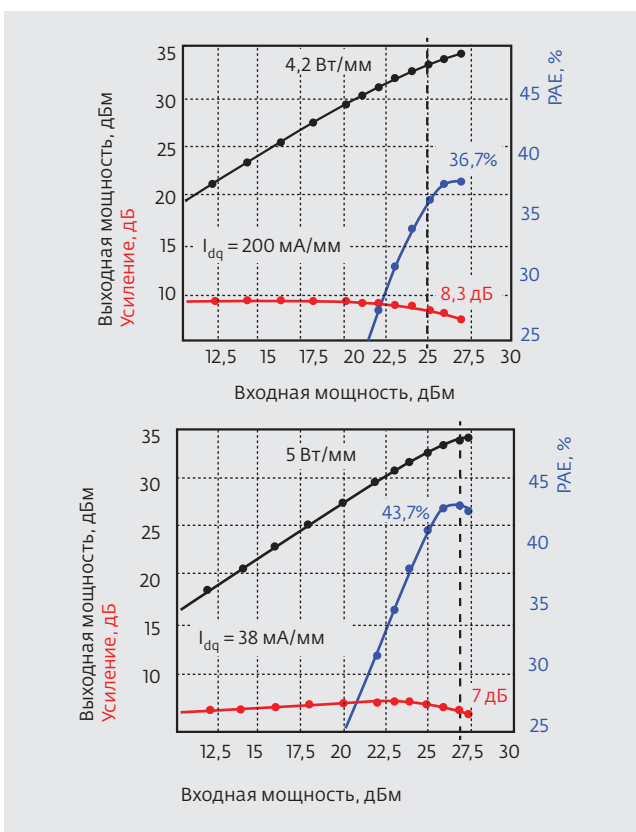


Рис.8. Рекордные (на 2007 год) мощностные параметры AlGaIn/AlN/GaN НЕМТ мм-диапазона на частоте 40 ГГц ($U_{ds} = 28 \text{ В}$) фирмы NORTHROP GRUMMAN [21]

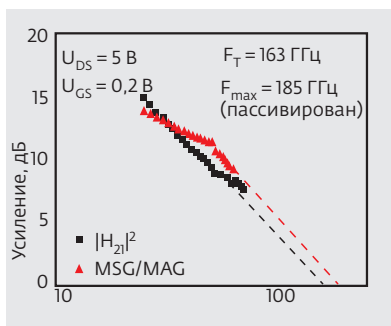


Рис.9. Рекордные частотные параметры AlGaIn/AlN/GaN HEMT с $L_g = 90$ нм, полученные в рамках программы ONR MINE MURI при UCSB [21, 51]

крутизны (уменьшению напряжения отсечки) с сохранением или даже повышением рабочих токов транзисторов. Результат – улучшение СВЧ-параметров HEMT в области частот 30–40 ГГц, что позволило создать полноценные одно- и двухкаскадные усилители с высокой выходной мощностью [21, 25, 26].

Следует отметить разновидность приборов с более толстым слоем AlN [2], достоящим до 3 нм [20], 3,5 нм [22], 4 нм [29] и даже до 5 нм [30]. Такие гетероструктуры обычно выращиваются методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) – из-за большой температуры ростового процесса газофазная эпитаксия (MOCVD) слоя AlN толщиной более 4 нм, как правило, приводит к его отслаиванию от GaN в результате больших тангенциальных напряжений, вызванных существенным несоответствием периодов решетки. Кроме того, подобные гетероструктуры нуждаются в эффективной пассивации, желательно – непосредственно в ростовой камере. Наиболее эффективна пассивация посредством Al_2O_3 [30], который можно получить осаждением нескольких слоев Al с их последующим прокислением, например в озоне [22].

Статические ($G_m > 480$ мСм/мм, плотность тока сток-исток $I_{dss} > 2$ А/мм) и частотные ($F_t > 100$ ГГц [31]) параметры таких приборов весьма высоки, поскольку достигается высокая концентрация (до $3,5 \cdot 10^{13}$ см⁻² [29]) и подвижность (до 1800 см²/(В·с) [22]) электронного газа при очень малом расстоянии от затвора до канала (3–4 нм) [20, 22, 29–32]. Такие гетероструктуры считаются пригодными для создания приборов диапазона частот 100–300 ГГц. Однако им присущ ряд недостатков, наиболее существенный из которых – высокое сопротивление омических контактов, свыше 0,4 Ом·мм [20] из-за высокого потенциального барьера и слишком толстого слоя AlN (3–4 нм). Для снижения омического сопротивления предлагается технология вытравливания верхнего слоя AlN в области омических контактов с последующим зара-

щиванием слоями (сверху вниз) InN/InGaIn/GaN, что снижает удельное сопротивление до 0,2 Ом·мм [32]. Однако такая технология вряд ли найдет промыш-

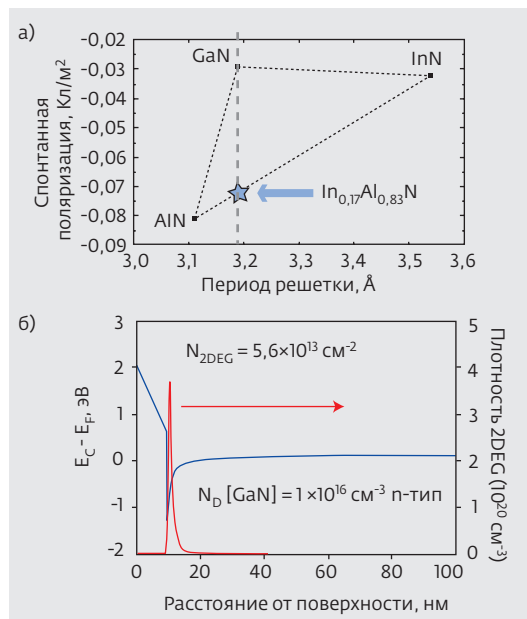


Рис.10. Параметры решеток InN, AlN, GaN и $In_{0,17}Al_{0,83}N$ (а), а также зонная диаграмма HEMT на основе InAlN/GaN гетероструктуры (б) [35а]

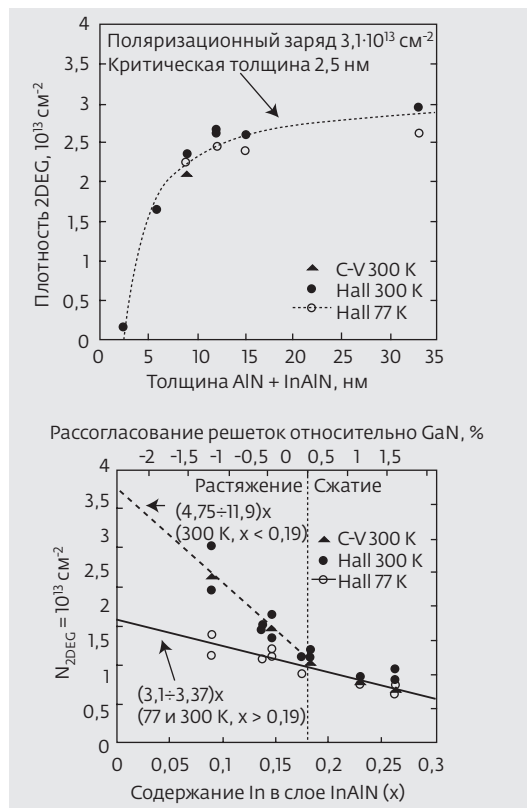


Рис.11. Концентрация электронов в HEMT InAlN/(AlN)/GaIn в зависимости от толщины и состава слоя InAlN [35]

Таблица 2. Параметры некоторых гетероструктур AlGaIn/GaN (типа I) для миллиметрового диапазона и характеристики изготовленных на них приборов

Источник	Параметры слоев гетероструктур					Топология транзисторов		Статические параметры					СВЧ-параметры			
	Сар-слой	Барьерный слой	Спейсер	Буфер	Подложка	W_g , мкм	L_g , мкм	Удельный ток исток I_{ds} (максимальный ток стока I_{dmax}), мА/мм	Напряжение отсечки, В	Крутизна S_{21} , мСм/мм	F_{T1} , ГГц	F_{max} , ГГц	Усиление, дБ	Максимальная удельная мощность, Вт/мм	PAE, %	
[4]	Нет	$Al_{0,3}Ga_{0,7}N$, 20–25 нм		GaN 1 мкм	Сапфир	80	0,27		-7	100	30	60	14 (4 ГГц)	3,6 (4 ГГц) при Кр=10,5 дБ	60	
[5]	Нет	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N$, 23 нм		GaN/ AlN 2/0,2 мкм	4H-SiC	4x50	0,25	910 (1100)	-3,75	285	40–44	84	917 (30 ГГц)	5,68 (30 ГГц) при Кр=7,1 дБ	44	
[6]	Нет	$Al_{0,35}Ga_{0,65}N$, 25 нм		GaN 2 мкм	Сапфир	100	0,18	750 (920)	-4,5	212	100	140	11,7 (12 ГГц)	4,13 (35 ГГц) при Кр=5,4 дБ	33	
[7]	Нет	$Al_{0,28}Ga_{0,72}N$, 27 нм	Нет	GaN 100 нм	GaN, легированная Fe	2x75	0,15	(1100)	-5,2	220	-	-	14	9,4 (10 ГГц) при Кр=11,3 дБ	40	
[8]	GaN 2 нм	$Al_{0,25}Ga_{0,75}N$, 20 нм		GaN 2 мкм	Сапфир	6x100	0,3	760 (1050)	-4	240	35	75	17,5-10 (6 ГГц)	3,2 (при 6 дБ компрессии на 6 ГГц)	-	
[9]	Нет	$Al_xGa_{(1-x)}N$		GaN	SiC	100	0,25	(1300)	-	275	65	110	-	6,4 (20 ГГц)	16	
															20	

Таблица 3. Параметры гетероструктур AlGaIn/AlN/GaN (тип II) и характеристики изготовленных на них приборов

Источник	Параметры слоев гетероструктур				Подложка	W _{gr} , мкм	Топология транзисторов		Статические параметры				СВЧ-параметры			
	Сар-слой	Барьерный слой	Спейсер (барьер)	Буфер			L _{gr} , мкм	Удельный ток I _{дсс} (максимальный ток стока I _{дmax}), мА/мм	Напряжение отсечки, В	Крутизна S _{гр} , мСм/мм	F _c , ГГц	F _{max} , ГГц	Усиление, дБ	Максимальная удельная мощность, Вт/мм	РАЕ, %	
[22]	Al ₂ O ₃ 3 нм	-	AlN 3,5 нм	GaN, легированный Fe	Сапфир	60	0,25	2350 (2400)	-8	480	52	60	-	-	-	-
[23]	GaN 2 нм	Al _{0,25} Ga _{0,75} N	AlN	GaN	SiC	200	0,4 FP**	1000 (1200)	-3,5 -5,5 (МДП)	320 260 (МДП)	-	60 (МДП)	9 дБ (8 ГГц)	6,1 (8 ГГц) при Kr = 7,8 дБ	40,3	
[24]	GaN 2 нм	Al _{0,26} Ga _{0,74} N _{17,5} 1 нм	AlN, 1 нм	Слаболегированный GaN 0,8 мкм, AlGaIn 1,1 мкм, GaN 20 нм	Алмаз	2×100	0,15 Γ***, FP	591±9 (786±16)	-2,0 ±0,1	346 ±7	48 ±0,6	-	-	-	-	
[24]	GaN 2 нм	Al _{0,26} Ga _{0,74} N _{17,5} 1 нм	AlN, 1 нм	Слаболегированный GaN 0,8 мкм, AlGaIn 1,1 мкм, GaN 20 нм	Алмаз	2×50	0,1 Γ, FP	604±32 (797±32)	-2,1 ±0,1	355 ±11	57 ±2,2	-	-	4,1 (10 ГГц)	48	
[24]	GaN 2 нм	Al _{0,26} Ga _{0,74} N _{17,5} 1 нм	AlN, 1 нм	Слаболегированный GaN 0,8 мкм, AlGaIn 1,1 мкм, GaN 20 нм	Алмаз	2×50	0,06	636 (685)	-3,2	250	70,1	-	-	-	-	
[24]	GaN 2 нм	Al _{0,26} Ga _{0,74} N _{17,5} 1 нм	AlN, 1 нм	Слаболегированный GaN 0,8 мкм, AlGaIn 1,1 мкм, GaN 20 нм	Алмаз	2×50	0,04	-	-	-	85	95	-	-	-	
[24]	GaN 2 нм	Al _{0,26} Ga _{0,74} N _{17,5} 1 нм	AlN, 1 нм	Слаболегированный GaN 0,8 мкм, AlGaIn 1,1 мкм, GaN 20 нм	Алмаз	2×50	0,06	580 (618)	-3,2	240	55,1	-	-	-	-	
[25]	GaN	Al _{0,315} Ga _{0,685} N	AlN	GaN на AlN	SiC	4×50	0,25	1200 (1400)	-3	501 (-2,5 В)	-	-	5,6-6,7 (35 ГГц) при Kr=6,7 дБ	4,5 (35 ГГц) при Kr=6,7 дБ	51	
[25]	GaN	Al _{0,315} Ga _{0,685} N	AlN	GaN на AlN	SiC	100	0,15-0,18 FP	-	-	-	60	120	6 (40 ГГц)	8,6 (40 ГГц) при Kr=4,1 дБ	34	
[26]	SiN	AlGaIn 22 нм	AlN	GaN, легированный Fe 2-4 мкм	SiC	1050	0,15- 0,18 FP	Двухкаскадный усилитель	-	-	-	-	6	5,4 (30 ГГц) при Kr=6 дБ, 5,2 (35 ГГц) при Kr=5 дБ	33	
[27]**	SiN 3,5-15 нм	Al _{0,3} Ga _{0,7} N, 22-24 нм	AlN	GaN 2,6 мкм	Сапфир	100	0,15-0,18 FP	Однокаскадный усилитель	-	-	-	-	6	8,05 (30 ГГц) при Kr=4,1 дБ	31	
[27]**	SiN 3,5-15 нм	Al _{0,3} Ga _{0,7} N, 22-24 нм	AlN	GaN 2,6 мкм	Сапфир	100	0,2	500 (без SiN)	-3,97	160	24	68	-	-	-	
[27]**	SiN 3,5-15 нм	Al _{0,3} Ga _{0,7} N, 22-24 нм	AlN	GaN 2,6 мкм	Сапфир	100	0,2	1200 (SiN, 15 нм)	-8,45	195	40	80	-	-	-	
[28]	Al ₂ O ₃ < 1 нм	Нет	AlN 3,5 нм	GaN	Сапфир, SiC	200	0,4	(1300)	-4	>300	19,6	30,9	-	-	-	

* Все слои выращены методом MOVPE in-situ.

** FP - затвор с полевым электродом.

*** Г - Г-образный затвор.

**** МДП - затвор отделен от полупроводника тонким слоем диэлектрика.

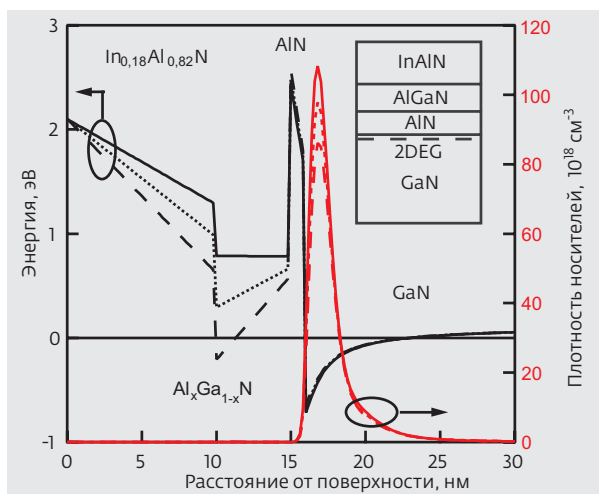


Рис.12. Повышения подвижности носителей в 2DEG в гетероструктуре InAlN/AlN/GaN за счет введения слоя AlGaIn (5 нм) между InAlN и AlN [37]

ленное применение, поскольку технологическая реализация данных процедур достаточно сложна.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InGaN/(In)GaN (ТИП III)

В 2001 году молодой словацкий ученый Ян Кузмик (Jan Kuzmik) предложил идею замены гетероструктуры типа AlGaIn/GaN, традиционной для НЕМТ на GaN, на новую гетероструктуру InGaN/(In)GaN [33, 34]. Эта публикация вызвала огромный отклик среди ученых и стимулировала многочисленные исследования в данном направлении, поскольку открывала колоссальные перспективы в развитии приборов на широкозонных полупроводниках, которые называют часто даже революционными.

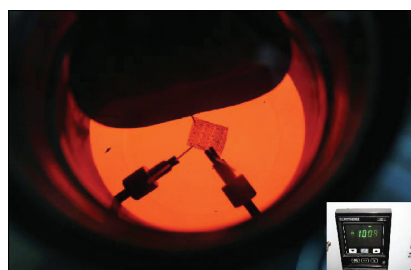
Под ее влиянием, в частности, была принята Европейская программа UltraGaN (www.ultragan.eu), которая ставит следующие задачи:

- развитие и технологическое освоение приборов на основе гетероструктур InAlN/(In)GaN;
- полная замена обычных гетероструктур AlGaIn/GaN;
- создание НЕМТ со следующими параметрами: плотность 2ДЕГ $n_{total} > 3,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; ток стока $> 3 \text{ А/мм}$; пробивное напряжение сток-исток $> 200 \text{ В}$; достижимая плотность мощности $> 30 \text{ Вт/мм}$ на 10 ГГц при отсутствии коллапса тока стока.

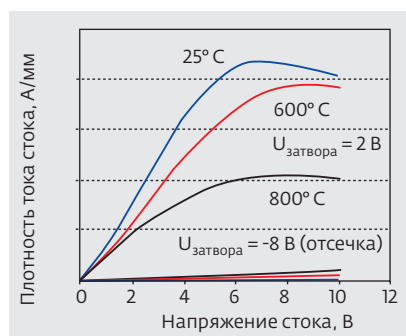
Цель проекта – усиление позиций Европы на коммерческом рынке и доли интеллектуальных прав в области нитридной технологии. В частности, из 100 патентов в данной области только девять европейских, в то время как 46% патентообладателей – из Японии, 24% – из США, 11% – из Южной Кореи. Особо подчеркивается, что уникальные параметры InAlN/(In)GaN гетероструктур позволят преодолеть существующий барьер в создании приборов терагерцового диапазона на широкозонных полупроводниках.

Основные особенности формирования 2ДЕГ в НЕМТ-гетероструктуре InAlN/(AlN)/GaN показаны на рис. 10 и 11. Важно отметить, что при содержании $X_{In}=17\%$ в барьерном слое $In_xAl_{(1-x)}N$ его период решетки совпадает с GaN. В гетероструктурах с прослойкой AlN мольная доля X_{In} обычно повышается до 19% для компенсации напряжений от слоя AlN. Ожидается, что отсутствие напряжений между слоями может существенно расширить диапазон рабочих температур, надежность и долговечность приборов на таких гетероструктурах.

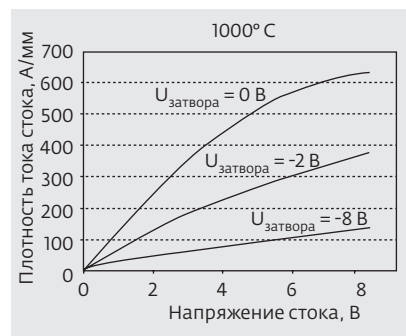
В период до 2007 года, судя по публикациям, данные работы развивались в основном усилиями двух научных групп по программе UltraGaN, возглавляемых Яном Кузмиком (Словацкая Академия наук, SAS) и Фаридом Медждоубом (Farid



а)



б)



в)

Рис 13. НЕМТ In_{0,19}Al_{0,81}N/(AlN)/GaN на стенде при высокотемпературных измерениях в вакууме при T=1000°С (а) и его вольт-амперные характеристики (ВАХ) при температурах 25, 600 и 800°С (б) и при 1000°С (в)

Таблица 4. Усредненные по пластинам малосигнальные и мощностные (35 ГГц) параметры InAlN/GaN НЕМТ, изготовленных на гетероструктурах трех коммерческих производителей США [38]

Производитель	A					B		C	
Длина канала, нм	150	150	150	125	125	150	150	125	125
Толщина барьера, нм	11	12,5	13,4	11,6	12	12	14	12	12
Доля In, %	2	2	2	2	2	9	9	5	5
Доля Al, %	58	58	58	73	73	86	86	68	68
Доля Ga, %	40	40	40	25	25	5	5	27	27
Усредненные статические и малосигнальные параметры									
Сопротивление омического контакта, Ом·мм	0,43	0,334	0,345	0,256	0,238	3,27	6,61	0,47	0,298
Слоевое сопротивление, Ом/□	317,0	307,1	346,7	232,9	229,6	649,3	284,1	399,0	338,4
F_T , ГГц	46,38	49,49	50,23	53,58	60,07	47,669	49,98	35,34	49,41
F_{max} , ГГц	47,87	74,23	73,39	80,27	80,65	75,07	83,71	52,62	45,3
Крутизна, мСм/мм	372,89	361,88	385,55	456,18	482,6	167,11	195,5	127,49	294,55
Напряжение отсечки $ V_{t} $, В	2,683	2,823	2,65	3,145	3,467	6,668	3,989	2,879	2,51
I_{max} , мА/мм	1091,78	1093,87	1093,46	1395,19	1469,39	1117,37	824,11	339,64	679,92
Напряжение пробоя, В	4,87	24,69	24,88	11,38	21,39	8,898	5,122	0,957	9,954
I_{dss} , мА/мм	896,75	914,96	893,8	1191,63	1287,59	1029,46	736,51	282,38	559,35
H2I	64,76	47,21	48,21	52,14	59,18	40,99	43,13	32,39	60,4
Ширина запрещенной зоны, эВ	4,95	4,95	4,95	5,39	5,39	5,57	5,57	5,12	5,12
Максимальные мощностные параметры									
PAE, %	26,6	13,8	17,5	14,6	20,4	13,1	20,6	N/A	20,9
Удельная мощность, Вт/мм	2,3	3,28	0,99	3,37	4,28	1,75	3,63	N/A	1,68
Усиление, дБ	9,11	6,13	5,82	7,68	9,26	5,56	7,05	N/A	7,54

Medjdoub) (Германия). Главным образом были исследованы гетероструктуры типа InAlN/AlN/GaN, поскольку введение прослойки AlN, как и прежде, дает дополнительные преимущества в повышении подвижности электронов 2DEG [35, 36]. Японские ученые предложили дополнительный способ повышения подвижности носителей в 2DEG до $1360 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при их концентрации $1,85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ за счет улучшения гладкости поверхности гетероструктуры InAlN/AlN/GaN путем введения промежуточного слоя AlGaIn толщиной 5 нм между InAlN и AlN [37] (рис.12).

Итоги работы группы UltraGaN были фактически подведены в докладе на конференции “2nd EU FET-Cluster meeting” [35] в ноябре 2007 года и в обширной статье [36] в 2008 году. Основным результатом большой исследовательской работы можно считать создание технологии изготовления широкозонных НЕМТ на гетероструктурах $\text{In}_{0,19}\text{Al}_{0,81}\text{N}/(\text{AlN})/\text{GaN}$ с ультратонким барьерным слоем InAlN толщиной от 13 до 3,5 нм. Изготовленные приборы демонстрируют отличные статические ($G_m > 500 \text{ мСм/мм}$, $I_{dss0} > 2 \text{ А/мм}$) и СВЧ-характеристики ($F_T = 70 \text{ ГГц}$ при $L_g = 80 \text{ нм}$). Но самое главное – приборы выдерживают рабочие температуры до 1000°C

(рис.13 и 14). Этот результат является поистине феноменальным – никогда ранее подобных СВЧ-приборов не существовало!

Работы группы UltraGaN стимулировали многочисленные исследования технологии выращивания подобных гетероструктур и физических процессов, происходящих в приборах на их основе, по всему миру. В результате были выделены и сформулированы ряд принципиальных проблем, стоящих на пути развития этого направления:

- физические условия осаждения слоев AlN и InN методом MOCVD принципиально различаются, что делает невозможным выращивание высококачественного InAlN этим методом. Решение было найдено в использовании молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменным ВЧ-источником атомарного азота или комбинации обоих методов в одной установке. Это требует определенных затрат по созданию подходящего ростового оборудования и оптимизации ростовых процессов, что существенно сдерживает промышленное освоение;
- наблюдается проникновение Ga в барьерный слой InAlN в процессе выращивания гетероструктуры, что приводит к сильному ухудшению

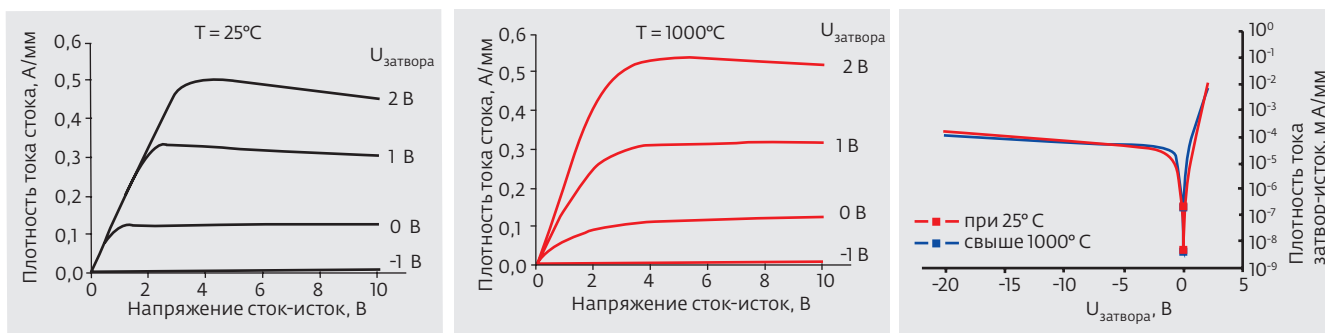


Рис.14. Выходные и затворные ВАХ НЕМТ $\text{In}_{0,19}\text{Al}_{0,81}\text{N}/(\text{AlN})/\text{GaN}$ с толщиной барьера 3,5 нм до и после температурного стресса при $T=1000^\circ\text{C}$ в течение 30 мин

свойств приборов [38]. Для предотвращения этого требуется тонкая настройка ростового процесса, детали которой не сообщаются;

- многие авторы наблюдали быструю деградацию приборов в рабочем режиме (в зависимости от концентрации электронов в канале), механизм которой заключается в цепочке процессов: генерация “горячих” фононов (0,12 эВ), приводящая к локальному разогреву канала, которые затем быстро переходят в долгоживущие акустические фононы, вызывающие генерацию дефектов. Последние присоединяются к уже существующим дефектам, что способствует их росту и деградации прибора [39, 40];
- не полностью устранены эффекты задержки включения НЕМТ по затвору и стоку (*gate and drain-lag effects*), которые связаны с электронными ловушками на гетерограницах, зависящих от условий ростового процесса, толщин и состава слоев [41, 42].

Все эти проблемы вызвали определенный скепсис в среде исследователей, что привело к попыткам некоторого возврата к поискам возможности улучшения качества гетероструктур $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ (тип I) путем введения небольшой концентрации In (2–8%) в барьерный слой AlGaIn [38]. В качестве примера интересно привести результаты сравнительного анализа параметров гетероструктур и изготовленных на них НЕМТ трех различных коммерческих европейских производителей, сделанного в работе [38] в 2008 году (табл.4). Виден сильный разброс характеристик гетероструктур и транзисторов как по постоянному току, так и по СВЧ-параметрам. Наилучшие результаты получены на гетероструктурах производителя А, где содержание In всего 2%, причем оптимальная доля Ga составила 25%. На частоте 35 ГГц получены высокие значения G_m , I_{dss} и удельная величина выходной мощности

(P_{out}), сравнимые с лучшими образцами НЕМТ на $\text{AlGaIn}/\text{AlN}/\text{GaIn}$ без In. Фактически ожидаемых преимуществ от введения In в барьер AlGaIn не наблюдается. Авторы отмечают, что ограничивающими факторами являются неизвестные рос-

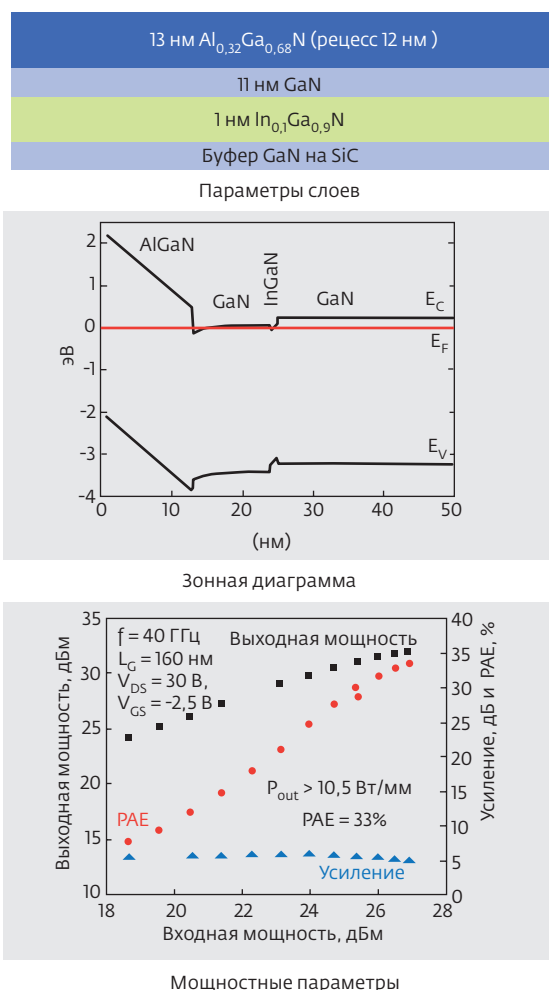


Рис.15. НЕМТ гетероструктура $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{InGaIn}/\text{GaIn}$ с улучшенными возможностями удержания электронов в канале [43–45]

товые дефекты и плохое качество гетерограниц, т.е. требуются дальнейшие усилия по улучшению качества материала.

В связи с вышеизложенным особо отметим выдающиеся частотные и мощностные параметры транзисторов, полученные на другом, весьма оригинальном варианте In-содержащей гетероструктуры (рис.15) [43–45]. В данном случае было предложено ввести слой $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ толщиной всего 1 нм под каналом GaN (рис.13а), что создало ступеньку на зонной диаграмме на нижней границе канала (рис.13б), препятствующую уходу электронов в буферный слой. В совокупности с заглублением затвора это позволило создать прибор с наивысшей на сегодня удельной выходной мощностью – более 10,5 Вт/мм на частоте 40 ГГц (рис.13в). Аналогичная попытка улучшения гетероструктуры была принята в работе [46], но с гораздо более скромными результатами.

Тем не менее, работы по совершенствованию гетероструктур InAlN/(AlN)/GaN и технологии изготовления приборов продолжают в университетских и отраслевых лабораториях. Наиболее интересные результаты были представлены в 2010 году. Были преодолены технологические трудности выращивания InAlN/AlN/GaN гетероструктур [47], в результате получены барьерные слои InAlN без примеси Ga как методом МЛЭ, так и МOCVD, с весьма высокими параметрами двумерного электронного газа: $n_s = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\mu_e > 1100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. НЕМТ с длиной затвора $L_g = 160 \text{ нм}$ и шириной (периферией) $W_g = 2150 \text{ мкм}$ ($F_t = 107 \text{ ГГц}$) продемонстрировал удельную выходную мощность 5,8 Вт/мм при PAE 43,6% в Ka-диапазоне частот при напряжении питания 20 В.

В работе [48] были успешно изготовлены и подробно исследованы $\text{In}_{0,17}\text{Al}_{0,83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ с толщинами барьера InAlN от 6 до 8,9 нм (рис.16). Представлены результаты подробного исследования зависимости статических и СВЧ-параметров приборов от толщины барьера и длины затворов L_g в диапазоне от 250 до 50 нм, как для непассивированных, так и пассивированных (Al_2O_3) структур. Впервые для широкозонных НЕМТ получена крутизна транзистора $G_m = 690 \text{ мСм/мм}$ при углублении затвора на 3–4 нм. Пробивные напряжения затворов при такой толщине барьера составляют 53–63 В в зависимости от метода измерений. Уровень параметров приборов в данной работе свидетельствует о наступлении новой эры развития СВЧ-электроники.

Обзор [49] подводит итог развитию нитридных структур за последние годы и посвящен скорее

философскому осмыслению наблюдаемых революционных процессов, чем анализу технологии. Авторы проводят параллель между развитием In-содержащих нитридов и сравнительно недавним прогрессом в повышении рабочих частот НЕМТ на основе арсенидных гетероструктур при переходе от рНЕМТ на GaAs к НЕМТ и рНЕМТ на InP. Корреляции процессов очевидны, но в случае нитридов повышение частот не сопровождается расплатой в виде снижения пробивных напряжений, что вызывает у авторов восторг и изумление.

Судя по представленным материалам и тону публикаций, долгожданный прорыв широкозонных НЕМТ-гетероструктур InGaN/AlN/GaN в миллиметровый диапазон состоялся. Для иллюстрации происходящих революционных процессов суммируем наиболее яркие результаты, полученные в последние годы на In-содержащих нитридных гетероструктурах (табл.5).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕМТ НА ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ТИПОВ I, II И III

В последние годы получили развитие некоторые технологические способы повышения СВЧ-характеристик НЕМТ, которые применяются для всех развитых типов гетероструктур.

Одним из наиболее полезных является углубление подзатворной области путем плазмохимического травления (рецесс), которое обычно совмещается с процедурой травления щели в диэлектрике SiN (см., например [27]). В результате происходит улучшение всех основных параметров:

- крутизна транзистора из-за уменьшения расстояния затвор-канал;
- снижение сопротивления истока и стока из-за отсутствия обеднения областей затвор-исток и затвор-сток транзистора;
- уменьшение или даже устранение переходных

$\text{Al}_{83}\text{In}_{17}\text{N}$ (8,9–7,0 нм)
AlN (1,5 нм)
GaN (2 мкм)
AlN
Подложка SiC

Рис.16. Исследуемая структура $\text{In}_{0,17}\text{Al}_{0,83}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ НЕМТ [48]

Таблица 5. Параметры In-содержащих НЕМТ-гетероструктур (тип III) и характеристики изготовленных на них приборов

Источник	Параметры слоев гетероструктур					Топология транзисторов		Статические параметры			СВЧ-параметры					Примечания
	Сар-слой	Барьерный слой	Спейсер (барьер)	Буфер	Подложка	W_g , мкм	L_g , мкм	Удельный ток стока I_{dss} (максимальный ток стока I_{dmax}), мА/мм	Напряжение отсечки, В	Крутизна G_m , мСм/мм	F_c , ГГц	F_{max} , ГГц	Усиление, дБ	Максимальная удельная мощность, Вт/мм	РАЕ, %	
43-45*	—**	$Al_{0,32}Ga_{0,68}N$, 13 нм	Канал: 11 нм GaN, затем 1 нм $In_{0,1}Ga_{0,9}As$	GaN	SiC	250	0,16				—	—	5-6 дБ (40 ГГц)	>10,5 (40 ГГц) при $K_p=5$ дБ	33	Травление подзатворной канавки на глубину 12 нм (рецесс), без пассивации SiNx
50	Нет	$Al_{0,81}In_{0,19}N$, 13 нм	AlN, 1 нм	GaN, 1 мкм	Сапфир	25	0,25	2000 (2350)	-8	265	—	—	153 при $U_p=6$ В (124 при $U_p=18$ В)	—	—	Дополнительная оптимизация для уменьшения Spur
51	SiN 3 нм	$Al_{0,86}In_{0,14}N$, 6 нм	—	GaN	SiC	—	0,06	(1340)	—	389	172	206	—	—	—	
39	Нет	InAlN, 7,5 нм	AlN	6H-SiC	800	0,25		604 (861)	-2,5	355	43	66	14 дБ (10 ГГц)	2 (10 ГГц) при $K_p=11,5$ дБ	29,3	
											34	45	—	—	—	
											48	65	—	—	—	

* Указана структура слоев после травливания 12 нм.

** Нет данных, поскольку указана структура после травления.

процессов при включении транзистора из-за уменьшения влияния ловушек в области затвор-сток, так как поверхность, на которой они находятся, может быть отодвинута на безопасное расстояние;

- повышаются F_t и F_{max} , поскольку отпадает необходимость пассивации затворов транзисторов.

В этой связи предлагается выращивать пассивирующий Si_3N_4 методом MOCVD сразу непосредственно после выращивания всех слоев полупроводниковой гетероструктуры для уменьшения концентрации ловушек на границе раздела [27]. При этом, правда, возникают проблемы с изготовлением омических контактов, так как при вжигании через диэлектрик омическое сопротивление получается в несколько раз хуже, чем в обычной технологии.

Авторы работы [28] в развитие этой идеи предложили вместо Si_3N_4 использовать подзатворный диэлектрик Al_2O_3 путем окисления части верхнего слоя AlN в потоке озона, создаваемого ультрафиолетом. Созданная таким образом $Al_2O_3/AlN/GaN$ НЕМТ-гетероструктура обладала очень высокими параметрами 2DEG: подвижность носителей более $1800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при их концентрации $2,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, что позволило получить слоевое сопротивление гетероструктуры всего $167 \text{ Ом}/\square$. Аналогичные идеи также развиваются авторами работы [52]. Сопротивление омических контактов в результате было понижено до $0,45 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$ и проблема была решена.

Важность пассивации поверхности гетероструктуры после изготовления затворов особенно остро стоит для гетероструктур с тонким барьерным слоем $InAlN$. Например, в работе [53] сравнивались слоевые сопротивления ненапряженных гетероструктур $InAlN/GaN$ с толщинами барьеров 18, 11 и 7,5 нм до и после пассивации диэлектриком Si_3N_4 . Установлено, что наиболее сильное изменение слоевого сопротивления от 2000 до $350 \text{ Ом}/\square$ наблюдается для самых тонких гетероструктур.

В связи с этим в последние годы развернулись интенсивные поиски оптимальных пассивирующих систем для $InAlN/GaN$, среди которых встречаются довольно экзотические соединения – Gd_2O_3 , $GdScO_3$ [55] и ZrO_2 , HfO_2 [54]. Применение данных соединений, часто в комбинации с Al_2O_3 , позволяет увеличить в 2,5 раза импульсный ток транзистора, его крутизну и значительно уменьшить времена включения за счет компенсации поверхностных состояний [56].

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Информация, представленная в настоящем обзоре, свидетельствует о технологическом прорыве последних лет в разработке конструкции и технологии изготовления наногетероструктур **(Al,Ga,In)N/GaN, который позволил повысить параметры** двумерного электронного газа при одновременном уменьшении толщины активных слоев до 3–15 нм. Зарубежные исследователи достигли частотных параметров широкозонных НЕМТ на подложках из сапфира, SiC , синтетического алмаза и кремния, приближающихся к рекордным параметрам рНЕМТ и мНЕМТ на подложках InP и $GaAs$. Эти гетероструктуры явились основой для разработки и создания высокоэффективных МИС усилителей мощности **К-, Q-, V- и W-диапазонов**, в 10–15 раз превосходящих МИС на основе рНЕМТ и мНЕМТ $GaAs$ по массогабаритным параметрам. Ведущими зарубежными производителями (Northrop Grumman, Cree, TriQuint и др.) уже освоен выпуск широкой номенклатуры МИС УМ на $AlGaIn/AlN/GaN/SiC$ с рабочими частотами до 100 ГГц. Разрабатываются и приемопередающие модули АФАР для радиолокаторов диапазона 94 ГГц (QuinStar Technology совместно с HRL) с выходной мощностью более 5 Вт (удельная выходная мощность $>4 \text{ Вт}/\text{мм}$).

Возможно, мы являемся свидетелями наступления новой эпохи в СВЧ-микродателектронике, связанной с расширением области применения широкозонных НЕМТ в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн, поскольку перед разработчиками радиоаппаратуры открываются поистине фантастические возможности.

Следует отметить, что работы в данном направлении также активно развиваются и в России. В частности, в течение 2010 года в Институте СВЧ полупроводниковой электроники (ИСВЧПЭ) РАН на гетероструктурах $AlGaIn/AlN/GaN$ отечественного производства (ЗАО “Элма-Малахит”) были изготовлены полевые транзисторы с $F_t = 77,3 \text{ ГГц}$ и $F_{max} = 177 \text{ ГГц}$, имеющие коэффициент усиления по мощности более 11,5 дБ на частоте 35 ГГц [55]. На базе данных транзисторов была впервые в России разработана и успешно реализована МИС трехкаскадного усилителя мощности диапазона частот 27–37 ГГц с $K_p > 20 \text{ дБ}$ и максимальной выходной мощностью 300 мВт в импульсном режиме [56]. В соответствии с Федеральной целевой программой “Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники” предполагается дальнейшее развитие научных и прикладных исследований в данном направлении. В частности – освоение гете-

роструктур InAlN/AlN/GaN для создания приборов с рабочими частотами 30–100 ГГц, с участием ведущих отечественных предприятий и институтов (ФГУП “НПП “Пульсар”, ФГУП “НПП “Исток”, ЗАО “Элма-Малахит”, ОАО “Светлана-Рост”, ИСВЧПЭ РАН и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. **U.K.Mishra, P.Parikh, Y.F.Wu.** AlGaIn/GaN HEMTs – An overview of device operation and applications. – Proceedings of the IEEE, vol. 90, No 6, June 2002.
2. **Likun Shen.** Advanced Polarization-Based Design of AlGaIn/GaN HEMTs. – Dissertation, University of California, Santa Barbara, 2004.
3. **M.Germain, M. Leys, et al.** High electron mobility in AlGaIn/GaN HEMT grown on sapphire: strain modification by means of AlN interlayers” – 2004 Materials Research Society Symp. Proc., vol. 798, p.Y10.22.1–Y10.22.6.
4. **Mark Kramer, et al.** Strongly Reduced Gate Lag in Undoped AlGaIn/GaN HEMTs on Sapphire. – <http://tte.ele.tue.nl/oed/publications/OED%20pubs%202003/Kramer%20strongly%20reduced%20SAFE%2003.pdf>.
5. **Cathy Lee, Paul Saunier, Jinwei Yang, M. Asif Khan.** AlGaIn–GaN HEMTs on SiC With CW Power Performance of >4 W/mm and 23% PAE at 35 GHz. – IEEE Electron Device Letters, vol. 24, No 10, p. 616–618, October 2003.
6. **W. Lu, V. Kumar, R. Schwindt, E. Piner, and I. Adesida.** DC, RF, and Microwave Noise Performances of AlGaIn/GaN HEMTs on Sapphire Substrates. – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, November 2002, vol. 50, No 11, p. 2499–2504.
7. **K.K.Chu, et al.** 9.4-W/mm Power Density AlGaIn–GaN HEMTs on Free-Standing GaN Substrates. – IEEE Electron Device Letters, September 2004, vol. 25, No 9, p. 596–598.
8. **V.Desmaris, J.Eriksson, N.Rorsman, H.Zirath.** Fabrication and Characterization of Submicron AlGaIn/GaN HEMTs. – <http://www.ep.liu.se/ecp/008/posters/008/ecp00808p.pdf>
9. **Schwindt Randal S., et al.** Millimeter-wave high-power 0.25- μm gate-length AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrates. – IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2003, vol. 13, No 3, p. 93–95.
10. **Umesh K. Mishra, et al.** Study of the n+ GaN Cap in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors with Reduced Source–Drain Resistance. – Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007), p. L842–L844.
11. **E.L.Piner, D.M. Keogh, J.S. Flynn, and J.M Redwing.** AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor Structure Design and Effects on Electrical Properties.
12. **A.R. Barnes.** ESA GaN Noise Assessment – Summary Report. – QinetiQ, 2004.
13. **S. Piotrowicz, et al.** State of the Art 58W, 38% PAE X-Band AlGaIn/GaN HEMTs microstrip MMIC Amplifiers – IEEE Compound Semiconductor IC Symposium CSICS 2008, 12–15, 2008.
14. **G.H. Jessen, et al.** Short-Channel Effect Limitations on High Frequency Operation of AlGaIn/GaN HEMTs for T-Gate Devices. – IEEE Transactions on Electron Devices, Oct. 2007, vol.54, No10, p.2589–2597.
15. **J.P.Ibbetson, et al.** – Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. – Applied Physics Letters, vol. 77, No 2, 10 Jul 2000.
16. **I.P.Smorchkova, L.Chen, U.K.Mishra, et al.** AlN/GaN and (Al,Ga)N/AlN/GaN two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. – J. Appl. Phys. 90, 5196 (2001).
17. **M.Miyoshi, et al.** High-electron-mobility AlGaIn/AlN/GaN heterostructures grown on 100-mm-diam epitaxial AlN/sapphire templates by metalorganic vapor phase epitaxy. – Appl. Phys. Lett., Vol. 85, No. 10, 6 September 2004.
18. **Miyoshi Makoto, Egawa Takashi, Ishikawa Hiroyasu.** Study on mobility enhancement in MOVPE-grown AlGaIn/AlN/GaN HEMT structures using a thin AlN interfacial layer. – Solid-State Electronics, vol. 50, No 9–10, p. 1515–1521 (2006).
19. **Ma Zhi-Yong et al.** Growth and Characterization of AlGaIn/AlN/GaN HEMT Structures with a Compositionally Step-Graded AlGaIn Barrier Layer – Chinese Phys. Lett., vol. 24, p. 1705–1708 (2007).
20. **K. Chabak, et al.** Processing Methods for Low Ohmic Contact Resistance in AlN/GaN MOSHEMTs – CS MANTECH Conference, May 18th–21st, 2009.
21. **Mark Rosker.** The Present State of The Art of Wide Band Gap Semiconductors and Their Future – 2007 RFIC Symposium, 4 Jul 2007, p.159–162.
22. **C.Y. Chang, et al.** Very Low Sheet Resistance AlN/GaN High Electron Mobility Transistors – CS MANTECH Conference, May 18th–21st, 2009.
23. **Chen Tangsheng, et al.** AlGaIn/GaN MIS HEMT with AlN Dielectric. – MANTECH Conference, April 24–27, 2006.
24. **J.G.Felbinger, et al.** AlGaIn/GaN-on-Diamond HEMT Recent Progress. – http://group4labs.com/pdf/WOSCDICE_AlGaIn-GaN_HEMTs_Progress_Abstract.pdf.
25. **Ming-Yih Kao, et al.** AlGaIn/GaN HEMTs with PAE of 53% at 35 GHz for HPA and Multi-Function MMIC Applications. – TriQuint Semiconductor, 2007.
26. **Yifeng Wu, Primit Parikh.** High-power GaN HEMTs battle for vacuum-tube territory. – Compound Semiconductor, January/February 2006.
27. **M. Germain, et al.** Surface Stabilization for Higher Performance AlGaIn/GaN HEMT with in-situ MOVPE SiN” – Materials Research Society Symp. Proc., 2005, vol. 831, p. E6.7.1–E6.7.6.

28. **C.Y. Chang, et al.** Very Low Sheet Resistance AlN/GaN High Electron Mobility Transistors. – CS MANTECH Conference, May 18th-21st, 2009.
29. **T.Zimmermann, Y.Cao, D.Jena, H.G.Xing, P.Saunier** “4-nm AlN Barrier all Binary HFET with SiN_x Gate Dielectric” – International Journal of High Speed Electronics and Systems, vol. XX, No. X (2008), p. 1-7.
30. **Huili (Grace) Xing, T. Zimmermann, et al.** Ultrathin all-binary AlN/GaN based high-performance RF HEMT Technology. – Department of Electrical Engineering, University of Notre Dame, USA.
31. **N. Onojima, N. Hirose, T. Mimura, T. Matsui.** Ultrathin AlN/GaN heterostructure field-effect transistors with deposition of Si atoms on AlN barrier surface. – Appl. Phys. Lett. 93, 223501 (2008).
32. **C.Lian, T.Zimmermann, et al.** Molecular Beam Epitaxy Regrowth of Ohmics in Metal-face AlN/GaN Transistors. – CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010.
33. **Kuzmik Jan.** Power electronics on InAlN/(In)GaN: prospect for a record performance. – IEEE Electron Devices Letters, 2001, vol. 22, p.510–512.
34. **J.Kuzmik.** InAlN/(In)GaN high electron mobility transistors: some aspects of the quantum well heterostructure proposal. – Semicond. Sci. Technol., vol. 17, p.540–544 (2002).
35. **E.Kohn, F. Medjoub, J. Kuzmik, et al.** UltraGaN project: Breakthrough in GaN devices thanks to InAlN/GaN heterostructure. – 2nd EU FET-Cluster meeting, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), November 13-16, 2007.
36. **F.Medjoub, E. Kohn, et al.** Status of the Emerging InAlN/GaN Power HEMT Technology. – The Open Electrical and Electronic Engineering Journal, 2008, vol. 2, p. 1-7.
37. **Masanobu Hiroki, Narihiko Maeda, Takashi Kobayashi.** Fabrication of an InAlN/AlGaIn/AlN/GaN Heterostructure with a Flat Surface and High Electron Mobility. – Applied Physics Express 1 (2008) 111102.
38. **M.Trejo, et al.** Materials Characterization and Device Performance Survey of InAlN/GaN HEMT Layers from Commercial Sources. – CS MANTECH Conference, April 14-17, 2008.
39. **Matulionis A.; Morkoz H.** Hot phonons in InAlN/AlN/GaN heterostructure 2DEG channels. – Gallium Nitride Materials and Devices IV, Proceedings of the SPIE, vol. 7216 (2009), p. 721608–721608-14 (2009).
40. **J.H. Leach, H. Morkoz, et al.** “Degradation in InAlN/GaN-based heterostructure field effect transistors: Role of hot phonons” – Appl. Phys. Lett., vol. 95, No 22. (2009), 223504.
41. **J.Kusmik, et al.** Gate-lag and drain-lag effects in (GaN)/InAlN/GaN and InAlN/AlN/GaN HEMTs. – Physica Status Solidi (a) 204 (2007) p.2019.
42. **J.H. Leach, H. Morkoz, et al.** Transient current spectroscopy of lattice matched InAlN/AlN/GaN HFETs for identification of traps resulting in gate lag. – Gallium nitride materials and devices No4, San Jose CA , ETATS-UNIS (2009), vol. 7216.
43. **Umesh K. Mishra.** “Status of AlGaIn/GaN HEMT Technology-A UCSB perspective” – 13th GaAs Symposium, Paris, 2005, p. 21-28.
44. **T. Palacios, Keller, U. K. Mishra, et al.** High-Power AlGaIn/GaN HEMTs for Ka-Band Applications – IEEE Electron Device Letters, November 2005, vol. 26, No 11, p. 781-783.
45. **T. Palacios, Keller, U. K. Mishra, et al.** AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors With InGaIn Back-Barriers – IEEE Electron Device Letters, Vol. 27, No. 1, Jan. 2006
46. **Jie Liu, et al.** DC and RF Characteristics of AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN Double-Heterojunction HEMT. – IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 54, No 1, January 2007.
47. **J. Gillespie, M. Trejo, et al.** Ultra Thin Barrier Layers for mmW Frequencies in III-N HEMT Technologies. – CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010.
48. **Han Wang, T.Palacios, et al.** High Performance InAlN/GaN HEMTs on SiC Substrate – CS MANTECH Conference, May 17th-20th, 2010.
49. **Colombo Bolognesi, Nicolas Grandjean.** GaN HEMTs advance to ultrahigh bandwidth. – Compound Semiconductor, August/September 2010, vol. 16, No. 6, pp. 15-21.
50. **F. Medjdoub, E. Kohn, et al.** Above 2 A/mm drain current density of GaN HEMTs grown on Sapphire/IEEE Lester Eastman Conference on High Performance Devices, Ithaca (USA), 2006. – International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2007, vol. 17, No 1, p. 91-95.
51. **Masataka Higashiwaki, Takashi Mimura, Toshiaki Matsui.** High-Performance Short-Gate InAlN/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors. – Jpn. J. Appl. Phys. 45 (2006) p. L843-L845.
52. **K. Chabak, M. Trejo, et al.** Processing Methods for Low Ohmic Contact Resistance in AlN/GaN MOSHEMTs. – CS MANTECH Conference, May 18th-21st, 2009.
53. **J.Kusmik, et al.** Insulating films for InAlN/GaN-based MOSHEMT – CENG, Oktober 2007.
54. **J.Kusmik, G.Pozzovivo, et al.** Technology and performance of InAlN/AlN/GaN HEMTs with gate insulation and current collapse suppression using ZrO₂ or HfO₂. – IEEE Transactions On Electron Devices, 2008, vol. 55, p. 937–941.
55. **Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Галиев Р.Р. и др.** Исследования влияния толщины барьерного слоя гетероструктур AlGaIn/AlN/GaN/Сапфир на параметры НЕМТ КВЧ диапазона. – В сб.: IX научно-техническая конференция «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА» (Звенигород, 1-3 декабря 2010 г.).
56. **Федоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Галиев Р.Р. и др.** Усилители мощности КВЧ диапазона на гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN/Сапфир – см. там же.