

Развитие технологии нитрида галлия и перспективы его применения в СВЧ-электронике

Александр Балакирев, Андрей Туркин (Москва)

В настоящее время структуры на основе нитрида галлия и его твёрдых растворов широко применяются в оптоэлектронике и силовой электронике, однако уникальные свойства этого материала позволяют с успехом использовать его и в других областях.

В статье рассматриваются последние достижения в технологии создания СВЧ-транзисторов на основе нитрида галлия и описываются перспективы применения этого материала в СВЧ-электронике.

ВВЕДЕНИЕ

Нитрид галлия (GaN) давно интересует исследователей и разработчиков полупроводниковых приборов. Гетероструктуры GaN и его твёрдых растворов обладают физическими свойствами, которые обеспечивают электронным приборам, созданным на их основе, оптические, мощностные и частотные характеристики, позволяющие применять их в разных областях полупроводниковой электроники.

Структуры на основе полупроводниковых нитридов (GaN, AlN) и некоторые соединения типа AlGaN и InGaN уже около 20 лет рассматриваются как перспективные материалы для электронной и оптоэлектронной техники [1–3]. В этих материалах имеется возможность управлять концентрацией двумерного газа носителей, что позволяет оптимизировать их свойства под конкретные применения [4]. Структуры на основе GaN можно использовать в качестве активных сред в лазерных диодах и светодиодах в области коротких длин волн. С их помощью можно получать структуры с барьерами Шоттки для приборов силовой электроники.

Одним из направлений исследования этих материалов является создание светодиодов коротковолновой (синезелёной) области видимого спектра и ближней ультрафиолетовой области спектра, а также светодиодов белого цвета свечения на основе системы «кристалл-люминофор» (полупроводниковый кристалл, покрытый люминофором). Именно за создание ярких синих светодиодов на основе гетероструктур GaN и его твёрдых растворов, а также белых светодиодов, профессорам Исаму Акасаки и Хироси Амано из

Университета г. Нагоя (Япония) и профессору Шуджи Накамура из Университета Калифорнии (США) была присуждена Нобелевская премия по физике 2014 г. [5].

Однако следует отметить, что GaN является перспективным материалом не только для оптоэлектроники в целом и светодиодных структур в частности. На его основе успешно развиваются и другие направления современной электроники, в том числе создание СВЧ-транзисторов.

Транзисторы на основе GaN-гетероструктур перспективны для применения в передающих СВЧ-устройствах. Основное преимущество СВЧ-транзисторов на основе GaN – высокая удельная мощность, что позволяет существенно упростить топологию интегральных схем усилителя мощности, повысить эффективность, уменьшить массу и улучшить габаритные параметры. Развитие технологии на основе GaN в последние несколько лет привело к существенным практическим результатам и освоению в промышленном производстве мощных СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем [6].

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ GaN-СТРУКТУР ДЛЯ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ

Улучшение характеристик структур на основе GaN, применяемых для создания СВЧ-транзисторов, стало возможным благодаря разработке новых технологических приёмов.

Одним из таких методов является технология углубления подзатворной области путём плазмохимического травления, которое обычно совмеща-

ется с процессом травления щели в диэлектрике [4]. В результате происходит улучшение многих параметров. Например, увеличение крутизны 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 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. В связи с этим технологи предлагают выращивать пассивирующий слой диэлектрика непосредственно после выращивания всех слоёв гетероструктуры [4].

Кроме того, в последние годы вернулись исследования, направленные на поиск новых пассивирующих материалов для транзисторных гетероструктур на основе GaN и его твёрдых растворов. Применение новых материалов позволяет увеличить более чем в два раза импульсный ток транзистора и его крутизну, а также значительно уменьшить времена включения за счёт компенсации поверхностных состояний [4, 7].

Исследователи и разработчики из Cree, TriQuint, Northrop Grumman и других компаний достигли высоких частотных характеристик транзисторных структур, которые стали основой для разработки и создания эффективных интегральных схем усилителей мощности, работающих в разных диапазонах. Эти микросхемы более чем в 10 раз превосходят интегральные схемы на основе арсенида галлия (GaAs) по массогабаритным параметрам [4]. Упомянутыми производителями уже освоено массовый выпуск усилителей мощности на основе GaN-гетероструктур с частотами до 100 ГГц, а компания QuinStar Technology совместно с HRL разрабатывает приёмопередающие модули для радиолокаторов диапазона 94 ГГц с выходной мощностью более 5 Вт [4].

Таким образом, за последние несколько лет были решены ключевые

производственные и технологические проблемы, которые сдерживали выход транзисторов и монокристаллических ИС на основе GaN на коммерческий уровень [6]. В настоящее время началось активное внедрение технологии на основе GaN в область СВЧ-приборов. Темпы промышленного освоения новой технологии существенно (в 2–3 раза) превышают темпы, которыми развивались технологии создания приборов на основе кремния и GaAs [6]. В ближайшие годы приборы как на основе GaN, так и на основе GaAs могут освоить частотный диапазон 1...50 ГГц. Однако следует отметить, что, по сравнению с GaAs, технология на основе GaN обладает серьёзными преимуществами характеристик и свойств, тогда как технология на основе GaAs имеет меньшую себестоимость и более высокий уровень освоенности в массовом производстве [6].

Тем не менее, следует ожидать, что по мере внедрения технологии на основе GaN в массовое производство и с ростом выпуска продукции её себестоимость будет снижаться. Новые решения в области GaN-технологии

предлагают ведущие мировые производители СВЧ-приборов, в частности, компания RFHIC.

РЕШЕНИЯ КОМПАНИИ RFHIC ДЛЯ СВЧ-ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

Компания RFHIC (Южная Корея) была основана в 1999 г. и завоевала лидирующие позиции на рынках телекоммуникационного оборудования и оборудования для кабельного телевидения за счёт инновационного подхода к технологии создания компонентов. Для обеспечения заказчиков высококачественной продукцией на оптимальных условиях компанией RFHIC на собственном заводе реализован полный производственный цикл, включающий в себя разработку изделия и его сборку, в которую входит установка кристалла на основание, разварка контактов, корпусирование и герметизация.

В настоящее время компания RFHIC выпускает широкую номенклатуру изделий на основе GaN для СВЧ-электроники, начиная от усилителей для кабельного телевидения и заканчи-

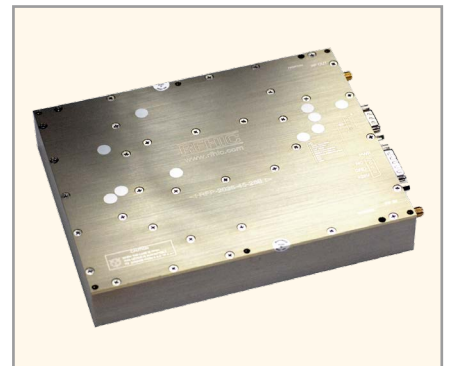


Рис. 1. Внешний вид усилителя для беспроводных систем связи компании RFHIC

вая мощными усилителями для радиолокации. Рассмотрим ключевые особенности изделий этой компании.

Прежде всего, в линейке продукции компании RFHIC стоит отметить усилители для беспроводных систем связи (см. рис. 1). Данные усилители предназначены для применения в современных сетях, использующих различные форматы передачи данных, включая LTE, CDMA, WCDMA и WiMAX. Их можно разделить условно на группы по мощности и рабочему диапазону напряжения.

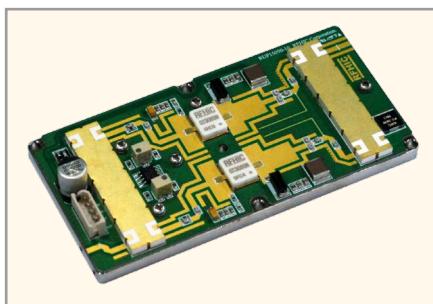


Рис. 2. Внешний вид усилителя для импульсных радиолокационных станций (РЛС) компании RFHIC

К первой группе можно отнести усилители с номинальной мощностью в диапазоне 5...10 Вт и с рабочим напряжением 28 В. Данные усилители предназначены для работы в диапазоне частот 2...3 ГГц и имеют коэффициент усиления 40 дБ.

К следующей группе можно отнести усилители с номинальной мощностью 28 Вт и с рабочим диапазоном напряжения 48...50 В. Данные усилители предназначены для работы в диапазоне частот 0,8...3 ГГц и имеют коэффициент усиления 44,5 дБ.

К третьей группе относятся усилители с номинальной мощностью 56 Вт и с рабочим диапазоном напряжения 48...50 В. Они также предназначены для работы в диапазоне частот 0,8...3 ГГц, а коэффициент усиления составляет 47,5 дБ.

К четвертой группе можно отнести усилители с номинальной мощностью 80 Вт и с рабочим диапазоном напряжения 48...50 В. Данные усилители предназначены для работы в диапазоне частот от 0,8...3 ГГц и имеют коэффициент усиления 55 дБ.

Кроме того, к числу усилителей для беспроводных систем связи относятся гибридные усилители с мощностью от 1 до 5 Вт и рабочим напряжением 28 В, а также усилители, реализованные на основе схемы Доггерти, мощностью 7 Вт и рабочим напряжением 31 В. Указанные усилители предназначены для работы в области частот 0,8...3 ГГц со значениями коэффициента усиления 27...38 дБ и в диапазоне частот 1,5...3 ГГц со значениями коэффициента усиления 14...16 дБ, соответственно.

Основные модели и характеристики усилителей для беспроводной связи компании RFHIC приведены в таблицах 1–3.

Поскольку эти усилители созданы на основе GaN, они могут работать при высоких значениях температуры и напряжения.

Усилители для импульсных радиолокационных станций (см. рис. 2) на базе GaN имеют широкие частотные диапазоны, покрывающие практически весь спектральный промежуток частот от 135 МГц до 10 ГГц, а также высокий уровень мощности.

Усилители для РЛС также стоит условно разделить на несколько групп. К первой можно отнести гибридные усилители. Они перекрывают достаточно широкий диапазон рабочих частот от 400–450 МГц до 9,3–9,5 ГГц. Их коэффициенты усиления могут принимать значения в диапазоне 11...33 дБ. Эффективность усилителей данной группы может достигать от 40 до 70%.

К следующей группе можно отнести малошумящие усилители. Эти усилители перекрывают диапазон рабочих частот от 1,2–1,4 ГГц до 9,3–9,5 ГГц, а коэффициент усиления принимает значение в диапазоне 10...18 дБ. Эффективность данных усилителей достигает значений от 18 до 30%.

К третьей группе стоит отнести паллетные усилители. Они перекрывают

Таблица 1. Основные модели и характеристики усилителей на основе GaN для беспроводной связи компании RFHIC

Модель	Частота, МГц	Усиление, дБм	Выходная мощность, дБм	КПД, %	Размеры, мм
<i>Усилители мощностью 5...10 Вт (28 В)</i>					
RTP21005-11	2110...2170	45	37	40	100 × 50 × 20
RTP21010-11	2110...2170	45	40	40	
RTP26010-N1	2570...2690	40	40	38	
<i>Усилители мощностью 28 Вт (48...50 В)</i>					
RTP08028-20	869...894	44,5	44,5	42	125 × 90 × 20
RTP18028-20	1805...1880			42	
RTP21028-20	2110...2170			42	
RTP26028-20	2496...2690			40	
<i>Усилители мощностью 56 Вт (48...50 В)</i>					
RTP08056-20	869...894	47,5	47,5	42	150 × 90 × 20
RTP18056-20	1805...1880				
RTP21056-20	2110...2170				
RTP26056-20	2620...2690				
<i>Усилители мощностью 80 Вт (48...50 В)</i>					
RTP08080-20	869...894	55	49	42	170 × 100 × 20
RTP18080-20	1805...1880				
RTP21080-20	2110...2170				
RTP26080-20	2620...2690				

Таблица 2. Характеристики гибридных усилителей на основе GaN для беспроводной связи компании RFHIC мощностью 1...5 Вт (28 В)

Модель	Частота, МГц	Коэффициент усиления, дБ	Выходная мощность, дБм	КПД, %	Рабочее напряжение, В
HT0808-15A	869...894	37	33	26	28
HT1818-15A	1805...1880	33	33	25	28
HT1818-15M	1805...1880	34	33	27	5/28
HT2121-15A	2110...2170	33	33	24,5	28
HT2121-15M	2110...2170	32	33	26	5/28
HT2626-15A	2610...2690	30	34	25	28
HT2626-15M	2610...2690	30	33	25	5/28
HT2627-15A	2650...2750	27	33	31	28
HT0808-30A	869...894	38	37	28	28
HT0909-30A	925...960	36	37	27	28
HT1818-30A	1805...1880	38	37	26	28
HT1919-30A	1930...1995	38	37	26	28
HT2121-30A	2110...2170	36	37	26	28
HT2626-30A	2610...2690	32	37	28	28

Таблица 3. Характеристики гибридных усилителей Доггерти на основе GaN для беспроводной связи компании RFHIC мощностью 7 Вт (31 В)

Модель	Частота, МГц	Пропускная способность, МГц	Коэффициент усиления, дБ
RTH18007-10	1805...1880	75	16
RTH20007-10	1930...1995	65	16
RTH21007-10	2110...2170	60	15
RTH26007-20	2620...2690	70	14

диапазон частот от 135–460 МГц до 9,0–10,0 ГГц, а коэффициент усиления занимает диапазон значений 8...39 дБ. Эффективность данного типа усилителей составляет от 5 до 20%.

Отдельную группу можно выделить мощные усилители. Значение выходной мощности таких усилителей может достигать значений от 200 Вт до 2,6 кВт, рабочие диапазоны частот перекрывают практически всю область от 1,02–1,03 ГГц до 9,30–9,50 ГГц. Значение их коэффициента усиления лежит в диапазоне 20...63 дБ, а эффективность составляет от 20 до 45%.

Основные модели и характеристики усилителей для РЛС на основе GaN компании RFHIC приведены в таблицах 4–8.

К этой же категории изделий относятся выпрямители-преобразователи на основе GaN. Их основные модели и характеристики также приведены в таблицах 4–8.

Ещё одним типом продукции компании RFHIC являются мощные усилители для различных применений (см. рис. 3). Они разработаны также на основе GaN, что позволяет применять эти устройства в жёстких условиях эксплуатации, в частности, при повышенной температуре окружающей среды. Данные усилители перекрывают достаточно широкие диапазоны частот, примерно от 20–512 МГц до 2,0–6,0 ГГц. Значения коэффициента усиления занимают диапазон 17...60 дБ, а рабочие значения напряжений лежат в диапазоне 24...33 В. Основные модели данной группы и их характеристики представлены в таблице 9.

Следует отметить, что компания RFHIC не ограничивается поставкой исключительно серийной продукции, а обеспечивает также доработку своих изделий согласно требованиям заказчика. Этим преимуществом могут воспользоваться российские потребители СВЧ-компонентов.

Например, из-за некоторых различий между отечественными и зарубежными стандартами на частотные диапазоны и соответствующими значениями мощностей изделий в СВЧ-диапазонах, зачастую у российских разработчиков нет возможности найти комплектующие зарубежного производства, которые полностью соответствовали бы российским требованиям. Возможным решением данной проблемы могло бы стать либо тестирование импортного усилителя в тре-

буемом диапазоне частот, либо небольшая доработка продукта, что обеспечит соответствие российским стандартам. Специалисты компании RFHIC готовы осуществить оба этих варианта, что подтверждается целым рядом проектов, успешно реализованных в течение нескольких последних лет компанией ProChip.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достигнутые за последнее время успехи в области технологии создания гетероструктур на основе GaN

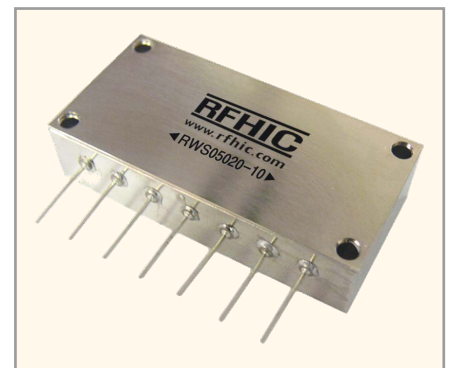


Рис. 3. Внешний вид мощного усилителя для различных применений компании RFHIC

Таблица 4. Характеристики гибридных усилителей для РЛС на основе GaN компании RFHIC

Модель	Частота	Кoeffициент усиления, дБ	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Рабочее напряжение, В
HR2731-50A	2700...3100	26	50	50	50
HR2933-50A	2700...3500	25	50	50	50
HR2933-70A	2900...3300	24	80	50	50
HR5459-25B	5400...5900	20	25	40	50
RRC94030-10	9300...9500	17	25	40	50
HR9395-08A	9300...9500	11	8	40	50
HR9395-30A	9300...9500	9	30	40	50
RNP04006-A1	400...450	33	4	70	24

Таблица 5. Характеристики маломощных усилителей для РЛС на основе GaN компании RFHIC

Модель	Частота	Кoeffициент усиления, дБ	P1dB, дБм	Входная мощность, дБм	Рабочее напряжение, В
CL1302D-L	1200...1400	18	20	30	5
CL3102D-L	2700...3500	11,5	20	30	5
CL5602	5400...5900	15	23	18	5
CL9402	9300...9500	10	22	18	5

Таблица 6. Характеристики палетных усилителей для РЛС на основе GaN компании RFHIC

Модель	Частота	Кoeffициент усиления, дБ	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Рабочее напряжение, В
RRP03250-10	135...460	31	300	20	50
RRP10350-10	1030...1090	28	350	10	50
RRP10800-10	1030...1090	27	800	10	50
RRP1214500-14	1200...1400	14	560	20	50
RRP2731080-39	2700...3100	39	100	20	50
RRP2731200-08	2700...3100	8	250	20	38
RRP2731330-09	2700...3100	9	400	20	50
RRP2731160-35	2700...3500	35	180	20	50
RRP2735200-30	2700...3500	32	230	20	50
RRP5257550-35	5250...5750	35	600	5	50
RRP5657500-35	5600...5700	35	550	10	50
RRP9095080-08	9000...9500	8	80	10	50
RRP9095150-18	9000...9500	18	150	10	50
RRP090100120-15	9000...10000	15	120	10	50
RRP3842075-30	3860...4140	29	75	10	50

Таблица 7. Характеристики мощных усилителей для РЛС на основе GaN компании RFHIC

Модель	Частота	Кoeffициент усиления, дБ	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Рабочее напряжение, В
RRP102600-10	1026...1034	20	2600	40	25,5
RRP131K0-10	1200...1400	53	1000	45	12,5
RRP291K0-10	2700...3100	60	1000	35	12,5
RRM291K5-10	2700...3100	62	1500	30	12,5
RRP311K0-10	2900...3300	60	1000	35	12,5
RRM27312K0-62	2700...3100	63	2000	30	12,5
RRM52571K0-50	5250...5750	50	1000	25	12,5
RRM9395200-56	9300...9500	56	200	20	50

Таблица 8. Характеристики выпрямителей-преобразователей для РЛС на основе GaN компании RFHIC

Модель	Частота, ГГц	Выходная мощность, Вт	Усиление, дБ	Сквозность, %	Ширина импульса, мкс
RFCR91-XTRM-015SP-200A	9,0...9,2	15	42	10	100
RFCR93-XTRM-015SP-500A	9,0...9,5	15	42		100
RFMR57-CTRM-020SP-500A	5,4...5,9	20	40		50
RFMR31-STRM-200-400B	2,9...3,3	200	53		500
RFMR13-LTRM-250-100B	1,3...1,4	250	54		2000
RFMR13-LTRM-250-200B	1,2...1,4	250	52		2000

Таблица 9. Основные модели и характеристики мощных усилителей на основе GaN компании RFHIC

Модель	Частота, МГц	РзdB [P1dB], дБм	Кэффициент усиления, дБ	Рабочее напряжение, В	Ток, А
RWS02520-10	20...512	43	40	28	2,5
RWS02540-10	20...512	46	41	28	3,2
RWS05020-10	20...1000	43	36	28	2,3
RWP03040-10	20...520	46	42	28	3,8
RWP03040-50	20...500	46	39	28	4
RWP03160-10	20...500	52	43	28	11
RWP05020-10	20...1000	43	40	28	2,3
RWP05040-10	20...1000	46	38	28	3,5
RWP06040-10	450...880	45	40	28	3
RWP06040-60	500...1000	46	42	28	4,5
RWP15040-10	500...2500	47	38	32	5,0
RWP15080-10	700...2700	50	53	32	10,0
RWP17050-10	700...2700	47	37	32	4,5
RUP15010-10	500...2500	40	17	28	1
RUP15020-10	500...2500	43	15	28	2
RUP15020-11	500...2500	43	50	30	3,5
RUP15030-10	500...2500	45	13	28	4
RUP15050-10	500...2500	47	13	28	5,5
RUP15050-11	500...2500	47	60	30	7
RUP15050-12	500...2500	47	60	30	7
RWP15020-50	1000...2000	43	29	28	3,6
RNP19040-50	1800...1900	47,5	33	28	3,7
RWP25020-50	2000...3000	44	25	28	2,8
RNP21040-50	2100...2170	47,5	33	28	3,9
RFC042	400...800	-	23	24	0,4
RFC092	800...1000	[30]	23	24	0,4
RFC1G22-24	20...1000	[30]	22	24	0,4
RFC1G21H4-24	20...1000	36	21	24	0,55
RFC1G21H4-24-S	20...1000	36	21	24	0,55
RFW2500H10-28	20...2500	36	17	28	0,7
RWM03060-10	20...520	49	55	28	7
RWM03125-10	20...520	51	55	28	9
RWM03125-20	20...520	51	55	28	9
RUM15040-10	500...2500	46 (Pнас)	56	28	5,5
RUM15040-20	500...2500	46 (Pнас)	56	28	5,5
RWP15100-R0	500...2500	50	42	33	10
RUM43010-10	2500...6000	40 (Pнас)	29	28	2,2
RUM43020-10	2000...6000	43 (Pнас)	35	28	4

и его твёрдых растворов демонстрируют перспективность применения этих материалов в электронных и оптоэлектронных приборах. Достижения отмечаются как в характеристиках светодиодных структур, так и в технологии изготовления этих структур для СВЧ-транзисторов. Новые исследования и разработки в области СВЧ-

микроэлектроники, связанные с расширением области применения транзисторов на основе широкозонных структур на базе GaN в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн, открывают широкие возможности для разработчиков.

Стоит также отметить, что переход технологии выращивания GaN-

гетероструктур на использование в массовом производстве подложек диаметром 6 дюймов (150 мм) позволит дополнительно ускорить развитие данного направления, а также существенно снизить себестоимость кристаллов за счёт увеличения выхода годной продукции. Такие подложки на протяжении уже нескольких лет используются в массовом производстве светодиодных структур и структур силовых приборов. Технологические успехи, которые обеспечили на пластинах диаметром 150 мм высокие характеристики в сочетании с отличной однородностью по толщине, удельным сопротивлением и качеством слоёв, позволили начать использование данных пластин и в массовом производстве СВЧ-компонентов. Уже в ближайшем будущем следует ожидать дальнейших успехов применения GaN-гетероструктур в области СВЧ-электроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туркин А.Н. Нитрид галлия как один из перспективных материалов в современной оптоэлектронике. Компоненты и технологии. 2011. №5. С. 6–10.
2. Юнович А.Э. Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов. Светотехника. 1996. № 5/6. С. 2–7.
3. Золина К.Г., Кудряшов В.Е., Туркин А.Н., Юнович А.Э. Спектры люминесценции голубых и зелёных светодиодов на основе многослойных гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с квантовыми ямами. ФТП. 1997. Том 31. № 9. С. 1055–1061.
4. Фёдоров Ю. Широкозонные гетероструктуры (Al,Ga,In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн. Электроника НТБ. 2011. № 2. С. 92–107.
5. Туркин А.Н., Юнович А.Э. Лауреаты Нобелевской Премии 2014 года: по физике – И. Акасаки, Х. Аmano, С. Накамура. Природа. 2015. № 1. С. 75–81.
6. Кищинский А.А. Твердотельные СВЧ-усилители на нитриде галлия – состояние и перспективы развития. Материалы 19-й Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. Вебер. 2009.
7. Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Д., Галиев Р.Р., Щербакова М.Ю., Свешиников Ю.Н., Цыленков И.Н. Усилители мощности КВЧ-диапазона на гетероструктурах AlGaIn/AlN/GaN/Сапфир. Материалы IX Научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА». Звенигород. 1–3 декабря 2010 г. С. 44–46.

