

# GaN-транзистор Integra Technologies с выходной мощностью 1 кВт для радарных применений S-диапазона

Джон УОЛКЕР (John WALKER)  
jwalker@integratech.com  
Габриэль ФАРМИКОУН  
(Gabriele FORMICONE)  
Фоад Боуери (Fouad BOUERI)  
Брайан Д. БАТАЛЬЯ  
(Brian D. BATTAGLIA)  
Перевод: Станислав ДИДИЛЕВ  
sd@etsc.ru

**В статье рассматриваются особенности применения и конструкция нитрид-галлиевого (GaN) транзистора с выходной мощностью 1 кВт, предназначенного для использования в радарх S-диапазона. На данный момент это один из самых мощных приборов, работающих в этом частотном диапазоне. Создание подобного транзистора является существенным шагом вперед, поскольку его рабочие характеристики значительно превосходят достигнутые ранее у других транзисторов сходного назначения.**

## Введение

Ни для кого не секрет, что кремниевые биполярные транзисторы уже много лет успешно используются в радарх S-диапазона, и их будут применять еще многие годы. Эта технология хорошо изучена и обеспечивает высокую эффективность (порядка 50% при работе в классе С). Более того, конструкция цепей смещения биполярных транзисторов является самой простой по сравнению с другими типами таких устройств и требует минимального количества компонентов.

Однако эта технология обладает тремя существенными недостатками: это низкое усиление (порядка 9 дБ, при использовании мощных приборов), высокое соотношение выходной емкости в пересчете на 1 Вт выходной мощности (что накладывает ограничения на соотношение выходная мощность/рабочий диапазон частот), а также необходимость использовать изолирующие слои в конструкции корпуса транзистора: обычно оксид бериллия (BeO), а в некоторых случаях — нитрид алюминия (AlN). Низкое усиление является результатом использования резисторов в цепи эмиттера. Эти резисторы предназначены для предотвращения теплового пробоя транзистора, однако их применение создает отрицательную обратную связь, что негативно сказывается на усилении. В качестве типичного примера можно привести биполярный транзистор IB2729M170 [1], обеспечивающий в импульсном режиме выходную мощность около 190 Вт в диапазоне частот 2,7–2,9 ГГц при КПД порядка 45% и усилении более 9 дБ.

В свою очередь, более «молодая» технология LDMOS также нашла свое применение в радарх S-диапазона. Одним из ее основных преимуществ является отсутствие изолирующих слоев в конструкции корпуса транзистора, что позволяет отказаться от использования вредных для окружающей среды материалов, таких как оксид бериллия. Также технология LDMOS обеспечивает чуть более высокое усиление (приблизительно на 2 дБ больше) по сравнению с биполярной, однако максимальная выходная мощность при использовании каждой из описанных технологий приблизительно одинакова. Как правило, LDMOS-транзисторы работают в классе усиления А/В, что отрицательно сказывается на эффективности: в классе А/В КПД такого транзистора приблизительно на 5% меньше, чем при работе в классе С.

Из-за особенностей конструкции LDMOS-транзистора необходимо наличие специальных схемотехнических решений, которые позволяют устранить низкочастотные пульсации по цепям питания. Для того чтобы избежать влияния таких пульсаций, нужно использовать большое количество компонентов в цепях затвора и стока (таких как индуктивности на ферритовых кольцах, вызывающие конденсаторы и т. д.).

В целом, следует признать, что применение LDMOS-транзисторов не позволило разработчикам кардинально улучшить характеристики создаваемых ими радарных систем. И поскольку технология изготовления кремниевых СВЧ-транзисторов (как LDMOS, так и биполярных) имеет определенные ограничения по частоте, то весьма маловероятно значительное улучшение характеристик

этих типов приборов, предназначенных для работы в S-диапазоне. Характеристики типичного LDMOS-транзистора можно проследить на примере ILD2731M140 [2], обеспечивающего в импульсном режиме выходную мощность около 180 Вт в диапазоне частот 2,7–3,1 ГГц при КПД порядка 40,5% и усилении более 10 дБ.

С другой стороны, GaN-транзисторы позволяют существенно улучшить характеристики проектируемых устройств. Поскольку нитрид-галлиевая структура является полупроводником с широкой запрещенной зоной, то можно использовать повышенное напряжение питания (50 В против 32 В у LDMOS), что, в свою очередь, дает возможность достичь более высокой плотности мощности. Более высокая плотность мощности обеспечивает низкое значение емкости на единицу выходной мощности, а это значит, что можно создать транзисторы, обладающие большей мощностью при сравнимом частотном диапазоне.

Повышенное напряжение питания означает более высокое сопротивление нагрузки при том же уровне выходной мощности, за счет этого можно достичь лучшей эффективности и упростить схемотехническое решение цепей согласования. Однако высокая плотность мощности вызывает проблемы с рассеиванием тепла, что является серьезным препятствием для использования GaN-транзисторов в непрерывном (CW) режиме, но делает их идеально подходящими для мощных импульсных применений.

В таблице 1 приведено сравнение характеристик различных типов транзисторов, работающих в диапазоне частот 2,7–2,9 ГГц

Таблица 1. Сравнение характеристик различных типов транзисторов

Прибор	Технология	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Усиление, дБ	Напряжение питания, В
IB2729M170	Биполярная (Si)	190	45	9,5	36
ILD2731M140	LDMOS	180	40,5	10,5	32
IGN2729M250 [3]	GaN	260	51	9,5	36

и предназначенных для усиления сигнала с длительностью импульса 300 мкс и коэффициентом заполнения 10%. Обратите внимание на то, что в данном случае GaN-транзистор работал при сравнимых с другими транзисторами уровнях питающего напряжения, а не при тех, которые обеспечили бы ему максимальную эффективность, усиление и выходную мощность.

В своей работе [4], опубликованной в 2011 году, Чжу-Юн Квак (Ju-Young Kwack) с соавторами представил конструкцию усилителя для радарных применений, работающего в диапазоне 2,9–3,2 ГГц с выходной мощностью 1 кВт. В этом усилителе требуемое значение выходной мощности было достигнуто путем сложения мощностей восьми GaN-транзисторов, каждый из которых обладал мощностью порядка 150 Вт. Площадь, занимаемая выходными цепями этого усилителя (без учета площади, занимаемой четырьмя изоляторами), составила 160 см<sup>2</sup>. Рассматриваемый в данном обзоре GaN-транзистор обеспечивает ту же выходную импульсную мощность (1 кВт) на частоте 2,8 ГГц при КПД минимум 56% и усилении 10 дБ. Поскольку при использовании единичного транзистора не требуется 10 сумматоров Вилкинсона, то площадь, занимаемая усилителем, составляет всего 32 см<sup>2</sup> — 1/5 площади усилителя, который создал Чжу-Юн Квак. Несколько известно автору, достигнуто новое рекордное значение пиковой мощности, полученное с единичного транзистора подобного типа, что задает новые стандарты эффективности, мощности и усиления для твердотельных усилителей.

### Конструкция и характеристики транзистора

#### Конструкция кристалла транзистора

Компания Integra Technologies производит кристаллы для GaN-транзисторов на 4-дюймовых подложках из карбида кремния (SiC). Длина затвора транзистора составляет 0,5 мкм. Конструкция кристалла предусматривает сквозные переходные отверстия для заземления истока. Поскольку транзистор разрабатывался для импульсных применений, конструкцию кристалла оптимизировали с целью достижения высоких значений напряжения пробоя сток-исток, для надежной работы транзистора при питающем напряжении 50 В.

Разработанный Integra Technologies кристалл (один из самых больших из тех, что выпускаются серийно) представляет собой

AlGaN/GaN-on-SiC HEMT структуру с длиной зоны затворов 36 мм. Каждый кристалл обеспечивает 150 Вт выходной мощности в диапазоне частот 2,7–2,9 ГГц, а транзистор, описываемый в этой статье, содержит семь таких кристаллов.

Конструкция кристалла разрабатывалась таким образом, чтобы его тепловое сопротивление было минимально. Этого удалось достичь за счет двух основных конструктивных решений: толщина подложки из карбида кремния была уменьшена до 0,076 мм, а расстояние между соседними ячейками кристалла в структуре было выбрано равным 30 мкм для обеспечения хорошего отвода тепла через подложку. Тем более что выбранное расстояние обеспечивает необходимую ширину контактных областей истока и стока, выполненных на основе золота, это улучшило электромиграцию и повысило надежность работы устройства. Конструкция AlGaN/GaN HEMT кристалла с шириной затвора 0,5 мкм отличается наличием структуры типа double field plate, а также увеличенной длиной дрейфового региона затвор-сток для устранения эффекта коллапса тока стока (DC-RF dispersion, DC-RF дисперсия) при работе под напряжением 50 В (номинальное значение).

Вертикальный срез структуры GaN-транзистора в районе его затворной области, полученный при помощи сканирующего электронного микроскопа, приведен на рис. 1.

В качестве одного из элементов структуры типа double field plate выступает непосредственно сам затвор транзистора Т-образной формы с длиной «ножки» порядка 0,5 мкм, сформированной путем травления первого пассивационного слоя из нитрида кремния, включая его горизонтальную часть, находящуюся над «ножкой» на поверхности пассивационного слоя. Этот элемент структуры транзистора создается в процессе формиро-

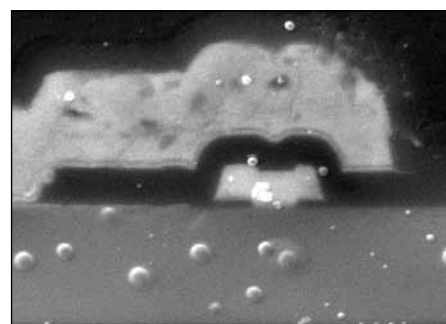


Рис. 1. Вертикальный срез структуры GaN-транзистора в районе его затворной области, полученный при помощи сканирующего электронного микроскопа

вания единого слоя металлизации и обеспечивает уменьшенное сопротивление затвора при работе на высокой частоте. Второй элемент структуры типа double field plate подключается к заземленному выводу истока внутри активной области транзистора и охватывает затвор по периметру для уменьшения емкости обратной связи (сток-затвор), в то же время способствуя уменьшению эффекта модуляции электропроводности области стока на выходе. Применение двух этих элементов позволяет добиться меньшей напряженности электрических полей на поверхности эпитаксиальных GaN-слоев и пассивационного слоя из нитрида кремния, что уменьшает эффект захвата/освобождения носителей заряда при переходе от слоя к слою. Выводы истока и стока имеют золотую металлизацию толщиной 3 мкм для улучшения электромиграции и обеспечения низкого последовательного сопротивления по всей ширине отдельного вывода, составляющей 300 мкм.

AlGaN/GaN HEMT структура, лежащая в основе транзистора, разработана Integra Technologies и создается посредством отработанного и хорошо зарекомендовавшего себя технологического процесса. Все омические контакты создаются на основе Ti/Al/Ni/Au структуры, спекаемой в результате быстрого термического процесса (Rapid Thermal Processing, RTP). Для изоляции устройства используется процедура тройной ионной имплантации. Пассивация поверхности слабо напряженным нитридом кремния выполняется при помощи процесса плазменного осаждения из газовой фазы (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD). Следует отметить, что процесс пассивации крайне важен для устранения эффекта DC-RF дисперсии.

Затвор транзистора длиной 0,5 мкм формируется путем слабо повреждающего травления слоя нитрида кремния и последующего электронно-лучевого напыления Ni/Au-структуры, которая формирует не только сам затвор, но и соединенную с ним структуру field plate. Последующий шаг нанесения нитрида кремния предназначен для изоляции структуры field plate, соединенной с затвором транзистора, от структуры field plate, принадлежащей к следующему за ней истоку транзистора. Формирование второй структуры field plate происходит за счет еще одного процесса электронно-лучевого напыления (в данном случае золота). При этом происходит нанесение слоя напыляемого металла на контактные области истока и стока для снижения переходного сопротивления. Затем происходит формирование воздушных мостов и нанесение покрытия из золота толщиной 3 мкм на области истока и стока, а также контактные площадки. Обработка пластины завершается процессом шлифовки обратной стороны подложки из карбида кремния до толщины 0,076 мм и последующего нанесения на нее 3-мкм слоя золота.

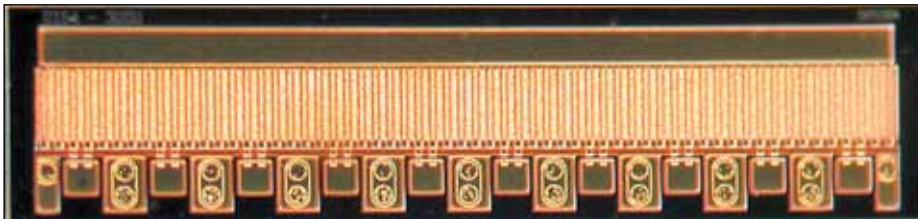


Рис. 2. Изображение кристалла GaN HEMT транзистора Integra Technologies с шириной области затворов 36 мм и длиной затвора 0,5 мкм

Кристалл крепится к корпусу транзистора посредством специальной AuSn-преформы при температуре +330 °С. Изображение кристалла транзистора приведено на рис. 2. Суммарная длина области затворов составляет 36 мм. Длина металлизированного контакта затвора — 300 мкм. Размер топологии затворов единичной ячейки равен 0,6 мм, а каждая ячейка состоит из двух затворов и имеет ширину 60 мкм. Таким образом, кристалл транзистора состоит из 60 подобных ячеек. Размеры кристалла составляют 3,9×1 мм.

Номинальное значение напряжения отсечки составляет –3,5 В, а максимально допустимое обратное напряжение затвор-сток превышает 150 В для надежной работы при питающем напряжении 50 В.

### Конструкция транзистора

На рис. 3 приведено изображение рассматриваемого в данной статье транзистора. Несмотря на то, что он выполнен в корпусе, который используется в двухтактных схемах усиления, его соответствующие «двойные» выводы соединяются на печатной плате между собой, то есть фактически транзистор работает как «обыкновенный», с одним выводом затвора и одним — стока. Цепи согласования находятся внутри корпуса и обеспечивают приемлемые значения импеданса. Учитывая тип транзистора, достичь требуемого согласования получается несколько проще, чем у транзисторов других типов.

В таблице 2 приведены сравнительные данные по оптимальным значениям импеданса

Таблица 2. Оптимальные значения импеданса по входу ( $Z_S$ ) и выходу ( $Z_L$ ) для различных типов транзисторов

Прибор	Частота, ГГц	$Z_S$ (оптимальное), Ом	$Z_L$ (оптимальное), Ом
IGN2729M800	2,7	1,6+j2,2	1,4-j3,1
	2,8	1,6+j2,4	1,5+j3,9
	2,9	1,8+j2,7	2,8+j6,2
ILD1011M1000HV	1,03	0,86+j0,34	0,3+j0,4

по входу ( $Z_S$ ) и выходу ( $Z_L$ ) для рассматриваемого нами GaN-транзистора и LDMOS-транзистора сравнимой мощности (1 кВт) на фиксированную частоту (1030 МГц). Судя по этим данным, низкие значения отношения емкости к выходной мощности позволяют GaN-транзистору достигать больших значений импеданса, что приводит к меньшим потерям в согласующих цепях и, следовательно, к более высокой эффективности работы.

### Рабочие характеристики транзистора

На рис. 4 приведены графики зависимости выходной мощности от входной мощности, КПД от выходной мощности и усиления от выходной мощности. Все данные были получены при следующих условиях:

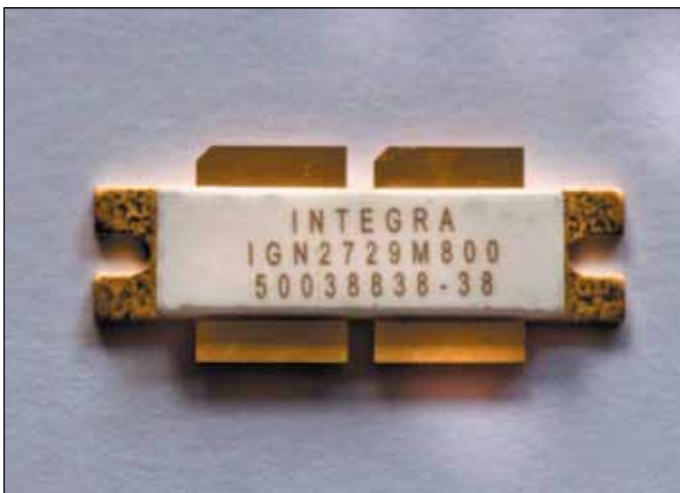


Рис. 3. Общий вид транзистора, обеспечивающего выходную импульсную мощность 1 кВт

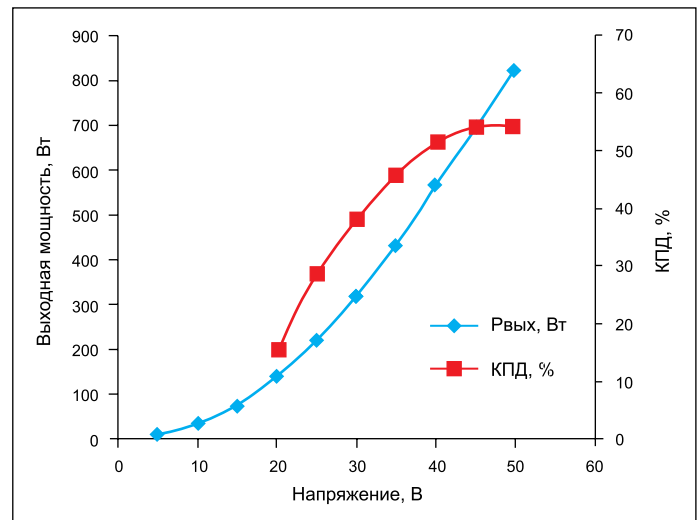


Рис. 5. Зависимость выходной мощности и КПД от напряжения на стоке

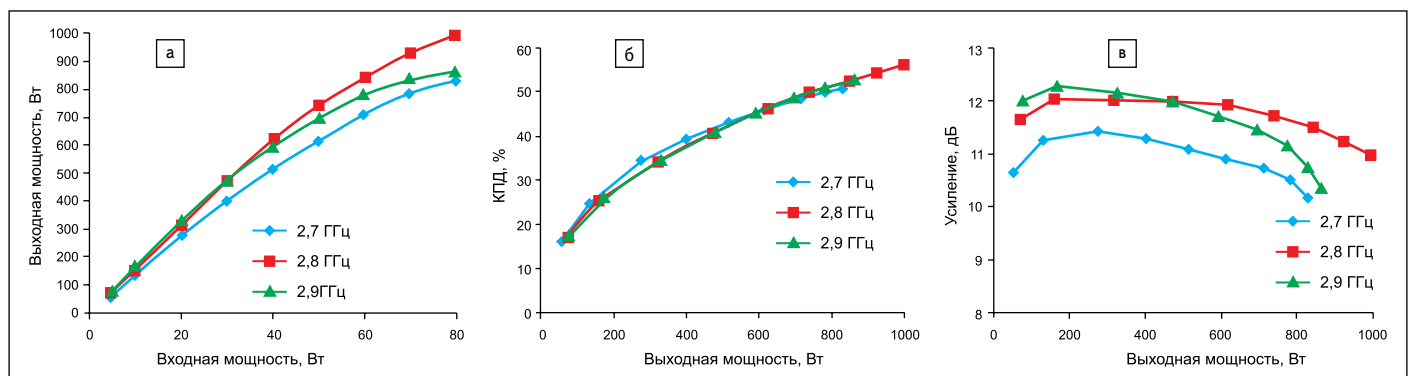


Рис. 4. Зависимость: а) выходной мощности транзистора от его входной мощности; б) КПД транзистора от его выходной мощности; в) усиления транзистора от его выходной мощности

напряжении питания, равном 50 В, токе покоя 100 мА, при усилении импульсного сигнала с длительностью импульса 300 мкс и коэффициентом заполнения 10%. Пиковое значение мощности чуть превышает 1 кВт при усилении 11 дБ и КПД, равном 56%.

На рис. 5 приведены графики зависимости выходной мощности и КПД транзистора от напряжения на стоке при работе на частоте 2,9 ГГц. Легко заметить, что КПД транзистора мало зависит от изменения питающего напряжения и остается практически неизменным в диапазоне напряжений 40–50 В. Выходная мощность транзистора в диапазоне 6 дБ практически линейно зависит от питающего напряжения, что облегчает работу АРУ.

Поскольку тепловые характеристики транзистора крайне важны, то их необходимо тщательно учитывать при оценке возможности его надежной работы в тех или иных приложениях. В частности, в таблице 3 приведены данные по неравномерности вершины импульса при различной длительности импульса и разных значениях коэффициента заполнения. Судя по данным таблицы, при длительности импульса свыше 200 мкс нагрев приводит к неравномерности вершины импульса, которая становится тем заметнее, чем больше его длительность, однако при коротких импульсах с малыми коэффициентами заполнения неравномерность практически незаметна. Максимальное значение переходного теплового сопротивления для транзистора составляет 0,13 °С/Вт.

Для практических применений очень важна стойкость транзистора к рассогласованию нагрузки. Значительное рассогласование (и, соответственно, большие значения КСВН),

**Таблица 3.** Зависимость неравномерности вершины импульса от его длительности и значения коэффициента заполнения

Длительность импульса, мкс	Коэффициент заполнения, %	Неравномерность вершины импульса, дБ
10	1	+0,07
10	10	+0,06
100	10	-0,08
200	10	-0,17
300	10	-0,22
500	10	-0,31
1000	10	-0,46

несомненно, приведет к выходу транзистора из строя. В ходе проведения тестирования прослеживалась тенденция снижения стойкости к рассогласованию при увеличении коэффициента заполнения, что явно указывает на тепловой механизм отказа транзистора. В данном отношении GaN-транзисторы, работающие при максимальной мощности, менее надежны, чем многие LDMOS-транзисторы, которые часто разрабатывают с учетом возможности работы с постоянным (CW) сигналом там, где GaN-транзистор может обеспечить 1 кВт лишь в импульсном режиме. Тем не менее можно защитить GaN-прибор от рассогласования: достаточно установить циркулятор на выходе.

Однако есть еще одна особенность, которую необходимо принимать во внимание: при относительно небольшом рассогласовании, которое не способно привести к повреждению транзистора, его работа может стать нестабильной, что выражается в значительном искажении формы импульса и появлении нежелательных колебаний. Рассматриваемый нами транзистор показал стабильную работу вплоть до КСВН 3:1.

## Заключение

В статье были рассмотрены характеристики и особенности транзистора для радарных применений S-диапазона с выходной мощностью 1 кВт. Прибор задает новые стандарты для транзисторов, работающих в этом частотном диапазоне. Несмотря на то, что здесь в основном были освещены импульсные применения, этот транзистор можно также использовать в линейных усилителях (работающих на частоте 2,856 ГГц), а также в медицине, например в установках радиочастотной абляции (Radio Frequency Ablation, RFA), применяемых при лечении раковых заболеваний.

Транзистор, для удобства использования, выполнен в корпусе, обычно применяемом в двухтактных схемах усиления. При таком исполнении обе части транзистора работают параллельно, поскольку соответствующие выводы соединены между собой на печатной плате. Наконец, благодаря высоким значениям выходного импеданса (табл. 2) технически возможно расширение рабочего диапазона частот, по крайней мере до 2,7–3,1 ГГц и даже несколько шире, при сохранении выходной мощности, близкой к 1 кВт.

## Литература

1. <http://www.integrattech.com/products/IB2729M170.pdf>
2. <http://www.integrattech.com/products/ILD2731M140.pdf>
3. <http://integrattech.com/products/IGN2735M250.pdf>
4. Ju-Young Kwack, Ki-Won Kim, Samuel Cho. 1 kW S-band Solid State Radar Amplifier. IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). 18–19 Apr. 2011.