

# Технология мощных СВЧ LDMOS-транзисторов для радарных передатчиков L-диапазона и авиационных применений

Габриэль ФАРМИКОУН  
(Gabriele FORMICONE)  
Фоад БОУЕРИ (Foad BOUERI)  
Джеф БЁРГЕР (Jeff BURGER)  
Уэй ЧЕНГ (Wei CHENG)  
Ян КИМ (Yang KIM)  
Джон ТИТИЗИАН (John TITIZIAN)  
Перевод: Станислав ДИДИЛЕВ  
sd@may.ru

**Постоянно улучшающиеся характеристики СВЧ LDMOS-транзисторов, разрабатываемых с учетом требований рынка устройств беспроводной связи, позволяют в настоящее время использовать их в авиационных и импульсных радарных применениях, где традиционно применяются мощные кремниевые биполярные транзисторы. В статье описывается СВЧ LDMOS-транзистор для импульсных применений с плотностью мощности более 1 Вт/мм и пиковым напряжением 85 В.**

## Введение

Передатчики для авиационных применений и обычные радары, использующие зеркальные антенны, где выходная мощность достигается путем суммирования мощностей нескольких транзисторов, предъявляют строгие требования к характеристикам используемых транзисторов:

- значительное усиление (4, а лучше 6 и более параллельно используемых транзисторов);
- стойкость к рассогласованию (минимум 3:1) для предотвращения выхода транзистора из строя при настройке;
- низкий уровень паразитной генерации при рассогласовании нагрузки (2:1);
- фазовая стабильность, оказывающая огромное влияние на доплеровскую чувствительность системы в целом.

Системы на основе АФАР предъявляют к транзисторам сходные требования, за исключением того, что усиление может быть ниже, поскольку в передатчике не используется сложение мощностей. Кремниевый биполярный транзистор (silicon Bipolar Junction Transistor — Si-BJT) является «рабочей лошадкой» всех современных радарных разработок с частотами до 3,5 ГГц. В типовой схеме кремниевый биполярный транзистор с усилением 9 дБ мощностью 110 Вт (IB3135M110 [1]) «раскачивает» еще 6 таких же транзисторов для получения выходной мощности 600 Вт. В работе [2] рассмотрен пример создания усилителя, в котором кремниевый биполярный транзистор с усилением 7,5 дБ и мощностью 150 Вт «раскачивает» еще 4 таких же прибо-

ра для достижения выходной мощности 550 Вт в диапазоне частот от 2,7 до 2,9 ГГц. Данная линейка усиления использовалась при создании 1,8-киловаттного усилителя мощности на эти частоты. Авторы взяли за основу кремниевый биполярный транзистор IB 2729M150 [1] и при помощи автоматизированной среды разработки оптимизировали конструкцию транзистора и повысили плотность мощности в его эмиттерной области до 0,5 Вт/мм на частоте 3,5 ГГц. Следует отметить, что из-за развития рынка беспроводных коммуникаций и под влиянием его требований к линейности усилительных устройств технология производства мощных LDMOS-транзисторов на основе кремния за последние 10 лет шагнула далеко вперед. Особенно ярко это можно проиллюстрировать транзисторами для диапазона 2,1 ГГц, предназначенными для базовых станций: приборы подобного класса обладают плотностью мощности 0,82 Вт/мм при усилении 14,5 дБ и пиковой эффективности порядка 50% [3]; плотностью мощности 0,9 Вт/мм при усилении 16,5 дБ и пиковой эффективности 62% [4]. При этом каждое новое поколение LDMOS-транзисторов обладает улучшенными характеристиками по сравнению с предыдущим. Все это позволяет сделать вывод о том, что LDMOS сегодня — достаточно надежная и отработанная технология, по многим параметрам не уступающая, а порой и превосходящая биполярную, и что ее проникновение на рынки авиационных, военных и коммуникационных применений — лишь вопрос времени.

В отличие от биполярных транзисторов, которые уже широко использовались в 1970-х го-

дах, LDMOS — достаточно молодая технология, которая преимущественно развивалась в конце 80-х — начале 90-х годов прошлого века и стала ключевой технологией на рынке базовых станций. Благодаря более высокому усилению, лучшей эффективности и самое главное — гораздо более высокой линейности, к середине 90-х LDMOS стала ведущей технологией на рынке устройств с высокой линейностью, полностью заменив биполярную [5]. При развитии технологии LDMOS оптимизация конструкции транзистора и большинство исследований были направлены на достижение большей линейности устройства [6]. Оптимизированные для импульсного сигнала и работы в классе «В», LDMOS-транзисторы вполне могут побороться с биполярными за пальму первенства в сегменте радарных применений.

Ниже речь пойдет о пятом поколении мощных СВЧ LDMOS-транзисторов Integra, специально разработанных и оптимизированных для авиационных и импульсных радарных применений L-диапазона, обладающих повышенной надежностью, которая обеспечивается во многом за счет применения только золотой металлизации.

## Конструкции LDMOS-транзисторов

Существует два основных класса конструкций LDMOS-транзисторов. Первый основывается на использовании заземленного экрана (grounded Faraday shield) для обеспечения изоляции стока (drain) от затвора (gate) и уменьшения емкости обратной связи C<sub>dg</sub>. Как правило, такая конструкция использует-

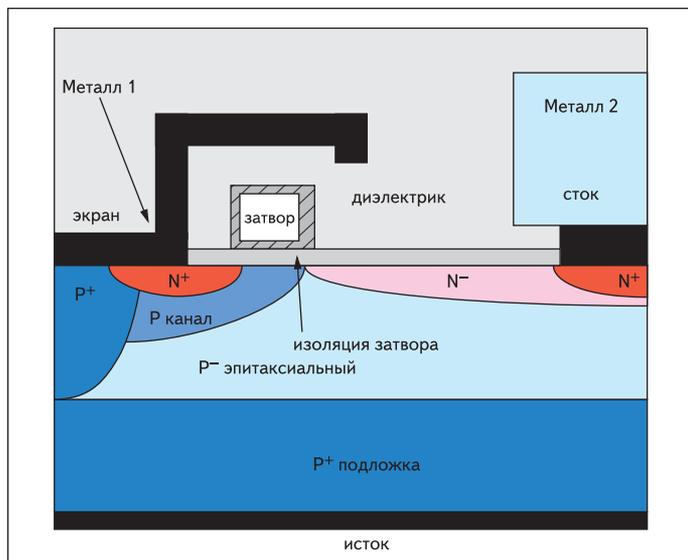


Рис. 1. Вертикальный срез структуры ячейки типового LDMOS-транзистора, использующего заземленный экран

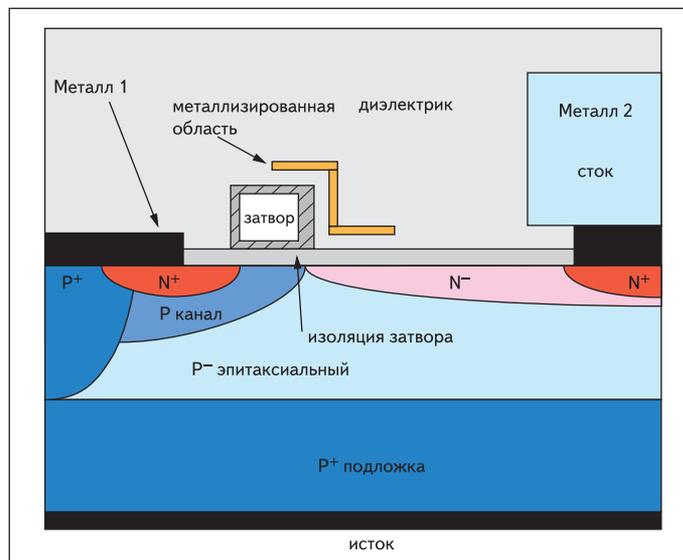


Рис. 2. Вертикальный срез структуры ячейки типового LDMOS-транзистора, использующего заземленную металлизированную область

ся при длине затвора более 0,5 мкм (рис. 1). Второй класс конструкций (использующийся преимущественно при длине затвора менее 0,5 мкм) основывается на применении заземленной металлизированной области (grounded field plate) и позволяет не только уменьшить емкость обратной связи  $C_{dg}$ , но и понизить значение дрейфа тока между стоком и затвором  $I_{dg}$ . На рис. 2 представлена конструкция подобного транзистора.

Как видно из рис. 2, заземленная металлизированная область находится ближе к той части канала, где размещен сток, что позволяет, как упоминалось ранее, эффективно уменьшить как  $C_{dg}$ , так и значение дрейфа  $I_{dg}$  [4]. Тем не менее, при использовании подобной конструкции транзистора увеличивается емкость  $C_{gs}$  между затвором (gate) и истоком (source). Это обусловлено тем, что в данной конструкции металлизированная область размещена ближе к затвору, чем аналогичный элемент конструкции (рис. 1) при использовании заземленного экрана. Компания Integra, используя только золотую металлизацию, адаптировала дизайн транзистора, изображенного на рис. 1.

Поскольку шаг структуры сток/исток ячейки LDMOS-транзистора больше, чем аналогичный шаг структуры база/эмиттер биполярного транзистора, то температура перехода не превышает 200 °С, даже при более высокой, чем у биполярного транзистора, плотности мощности (более 0,5 Вт/мм). Еще одним преимуществом подобной конструкции является размещение истока (source) на обратной стороне кристалла, что позволяет отказаться от использования дорогостоящих корпусов с изоляцией на основе оксида бериллия (BeO). Размещение истока на обратной стороне кристалла обеспечивает еще одно ценное свойство — низкое значение индуктивности истока, что в сочетании

с малой емкостью обратной связи обеспечивает LDMOS-транзисторам лучшие усилительные характеристики по сравнению с биполярными аналогами.

Низкое значение сопротивления канала сток/исток транзистора во включенном состоянии ( $R_{dsON}$ ) достигается за счет специального формирования дрейфовой пространств (drift region), что обеспечивает крайне высокую эффективность использования транзистора в импульсных усилителях мощности, работающих в классе «В» [6].

### Характеристики транзисторов

Была произведена разработка и определены характеристики LDMOS-транзисторов для авиационных применений, работающих на частоте 1030 МГц. Получены результаты для транзисторов мощностью 15 Вт и 17 Вт с пиковым напряжением 85 В, способных работать при напряжении питания до 32 или 36 В. Данные, приведенные на рис. 3, были получены при напряжении питания 26 В и подаче на вход пачки импульсного сигнала длительностью 32 мкс с коэффициентом заполнения 2%. Было использовано два кристалла из разных партий с различным дизайном, обеспечивающих в режиме насыщения мощность около 15 и 17 Вт соответственно, при пиковом усилении 16 дБ и пиковой эффективности стока 62% (показатели приведены для лучшего дизайна). Из графиков на рис. 3 заметно, что плотность мощности составляет более 1 Вт/мм даже при напряжении питания 26 В. Если использовать более высокое напряжение, например, 32 или 36 В, то значение плотности мощности будет только возрастать [6]. Следует отметить, что использование кристаллов из различных партий (разные пластины, различный дизайн кристалла) обусловлено процессом оптими-

зации конструкции кристалла для достижения требуемых характеристик импульсного режима работы.

Параметры LDMOS, приведенные на рис. 3, вполне могут соперничать с параметрами биполярных транзисторов, например, семейства IB1011, предназначенного для авиационных применений, или других LDMOS-транзисторов (при плотности мощности от 0,8 до 0,9 Вт/мм), чьи параметры приведены в соответствующей литературе [3–5]. Необходимо учесть, что большинство данных из приведенных источников были получены при использовании непрерывной несущей с частотой 2,1 ГГц, а также при использовании кристалла, изначально оптимизированного для достижения максимальной линейности, то есть выбирался транзистор с наилучшими показателями мощности и эффективности при заданных параметрах линейности (–30 дБс при модуляции двухтоновым сигналом или –40 дБс при CDMA-сигнале, или –37 дБс при сигнале W-CDMA с двумя несущими). Подчеркнем, что для LDMOS-транзисторов Integra процесс оптимизации конструкции кристалла (за счет подбора параметров стока и канала) в первую очередь

Большинство OEM-производителей ориентировано на рынки оборудования для базовых станций и WiMAX и производят свою продукцию на высокотехнологичных линиях по производству КМОП-кристаллов, используя при этом от двух до четырех слоев металлизации на основе алюминия или алюминия-меди. Integra Technologies в основном ориентируется на военные либо высоконадежные применения и поэтому производит LDMOS-транзисторы, оптимизированные для импульсных применений, с использованием двух и более слоев золотой металлизации на линиях, где уже налажен выпуск высоконадежных биполярных и VDMOS-транзисторов.

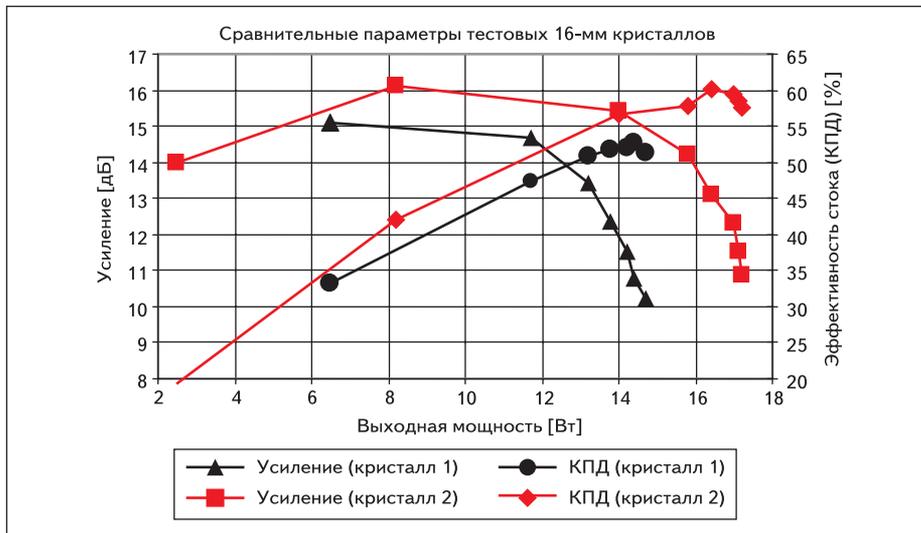


Рис. 3. Зависимость усиления и эффективности стока от выходной мощности для двух разных 16-миллиметровых кристаллов LDMOS при подаче на вход пачки импульсного сигнала с частотой 1030 МГц

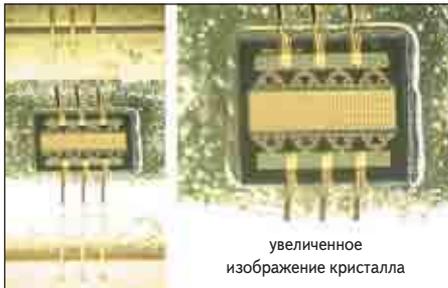


Рис. 4. 16-миллиметровый кристалл LDMOS и его увеличенное изображение

направлен на достижение хороших импульсных характеристик, а не линейности.

На рис. 4 и 5 изображены 16-миллиметровые и 60-миллиметровые кристаллы в соответствующих корпусах. Кроме того, на рис. 4 (в правой его части) приведено увеличенное изображение кристалла.

Обратите внимание на древовидную структуру входных и выходных сигнальных цепей, объединяющих отдельные ячейки транзистора. Подобное решение позволяет минимизировать фазовые задержки и рассогласова-

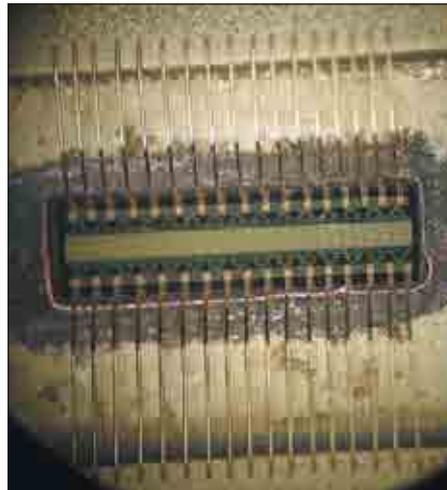


Рис. 5. 60-миллиметровый кристалл LDMOS

ние между отдельными ячейками транзистора. Данная топология может быть оптимизирована для заданных размеров, мощности и рабочей частоты транзистора. Для того чтобы избежать отказа транзистора, связанного с электромиграцией, ширина древовидной

структуры плавно увеличивается по направлению от ячейки транзистора к контактной площадке.

Несмотря на то, что стойкость LDMOS к фазовому шуму не так хороша, как у биполярных транзисторов, можно предположить, что в будущем, при дальнейшей оптимизации для импульсных применений, LDMOS вполне могут побороться за лидерство с биполярными транзисторами в этом сегменте рынка. А более дешевый корпус (не требуется изоляция  $\text{BeO}$ ), и более простые входные цепи (транзистор управляется напряжением) позволят ускорить процесс проникновения LDMOS на рынки авиационных и радарных применений.

## Заключение

Компании Integra удалось разработать и применить технологию золотой металлизации, обеспечивающую требуемое качество и высокую надежность приборов, выпускаемых для авиационных и военных применений. В отличие от других компаний, производящих LDMOS-транзисторы и ориентирующихся на телекоммуникационный рынок (что предъявляет высокие требования к линейности создаваемых ими приборов), Integra, используя свою технологию металлизации, ориентируется на рынок военных применений, что обуславливает оптимизацию LDMOS-транзисторов компании для импульсных применений. Компании удалось создать LDMOS-транзистор, выдерживающий пиковое напряжение 85 В и обладающий плотностью мощности около 1 Вт/мм, что превосходит подобные параметры биполярных транзисторов, в настоящее время представленных на рынке. ■

## Литература

1. [www.integratech.com](http://www.integratech.com)
2. Murae T., Fujii K., Matsuno T. High Power S-band Solid-State Amplifiers for Surveillance and Traffic Control Radars. IEEE MTT-S. 2001.
3. Dragon C., Brakensienk W., Burdeaux D., Burger W., Funk G., Hurst M., Rice D. 200W Push-Pull & 110W Single-Ended High Performance RF-LDMOS Transistors for WCDMA Basestation Applications. IEEE MTT-S. 2003.
4. Brech H., Brakensienk W., Burdeaux D., Burger W., Dragon C., Formicone G., Pryor B., Rice D. Record Efficiency and Gain at 2.1GHz of High Power RF Transistors for Cellular and 3G Base Stations. IEEE IEDM. 2003.
5. Burger W., Brech H., Burdeaux D., Dragon C., Formicone G., Honan M., Pryor B., Ren X. RF-LDMOS: A Device Technology for High Power RF Infrastructure Applications. IEEE CSIS Symposium. 2004.
6. Brech H., Burger W., Dragon C., Pryor B. Voltage Optimization for State of the Art RF-LDMOS for 2.1GHz W-CDMA Cellular Infrastructure Applications. IEEE MTT-S. 2003.