

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ НА КРЕМНИИ (GaN/Si) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ КОМПАНИИ ОММИС

В статье рассматриваются результаты проектирования и испытаний МИС СВЧ усилителя мощности, работающего на частотах около 40 ГГц и изготовленного с использованием нитрида галлия на кремнии с шириной затвора 100 нм. Представленный в статье усилитель работает в Ku-диапазоне с обеспечением усиления 20 дБ, выходной мощности 14 Вт при компрессии 4,5 дБ и КПД до 30%. Такая величина выходной мощности достигается при плотности рассеяния мощности 3,2 Вт/мм на транзисторе, что позволяет легко регулировать конечную температуру изделия.

До сегодняшнего дня сети 3G и 4G были развернуты в полосах частот до 4 ГГц. Для высокоскоростной передачи данных в сетях 5G требуется разработка новых изделий на более высоких частотах, например 27 или 37–40 ГГц в США, 24–27, 31–33 или 40–43 ГГц в Европе и 37–43 ГГц — в Китае. На таких частотах используемые в настоящее время технологии Silicon/LDMOS больше не в состоянии отвечать техническим требованиям сетей 5G. На частотах выше Ka-диапазона технологии GaN чаще всего обеспечивают ширину затвора 500, 250 или 150 нм. Компания ОММИС разработала технологию, обеспечивающую ширину затвора 100 нм. Эта технология,

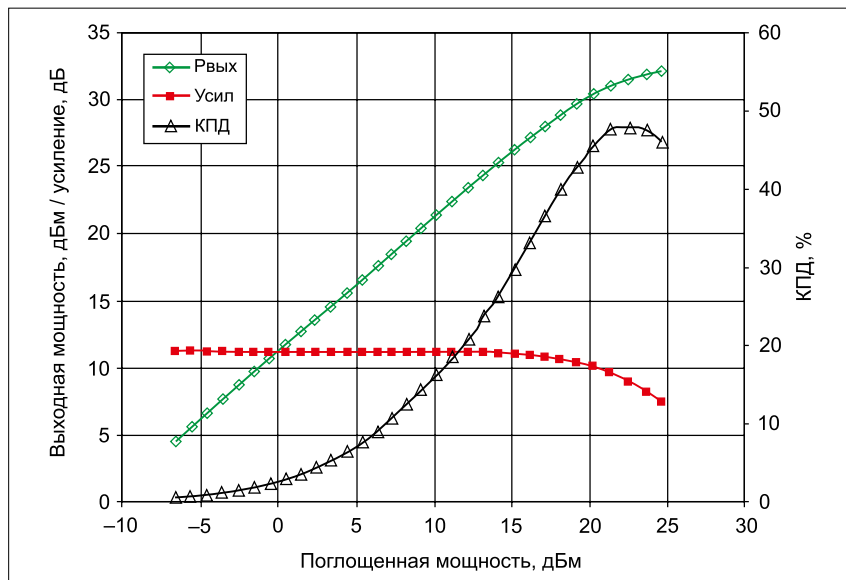
получившая название D01GH, позволяет достичь 100 ГГц.

Для реализации этого проекта компания ОММИС использовала процесс выращивания структур на основе нитрида галлия, на сегодняшний день уже доступный для контрактного производства. Принимая во внимание развитие технологий 5G и растущий объем рынка, компания выбрала процесс GaN/Si по следующим причинам:

- стоимость выращивания на кремнии ниже, чем на карбиде кремния;
- процесс лицензирования имеет значительно меньше рисков, чем лицензирование изделий на карбиде кремния;
- в долгосрочной перспективе этот тип процесса совместим для интеграции с кремниевыми КМОП-процессами.

Таблица 1. Основные технические характеристики GaN/Si процесса

Характеристика	Уровень
Максимальная частота, ГГц	105
Максимальное стабильное усиление на частоте 30 ГГц (2x25 мкм), дБ	13
Плотность мощности, Вт/мм	3,3
Проводимость, См/м	800
Сопротивление стока (Vds = 0 В), Ом·мм	0,6
Напряжение пробоя (300 мкА/мм), В	50
Максимальный ток стока (Vds = 3 В), А/мм	1,3
Рекомендуемое напряжение питания, В	12



▲ Рис. 1. Рабочие параметры транзистора размером 6x70 мкм на частоте 30 ГГц

Таблица 2. Параметры транзистора, полученные при мощности рассеяния 3,5 Вт/мм

Размер транзистора, мкм	Частота, ГГц	$V_{DS}$ , В	$I_{DS}$ , мА	$P_{ВВ}$ , дБм	$P_{ВВЫ}$ , дБм	Линейное усиление, дБ	Усиление мощности, дБ	$P_{DC}$ Вт/мм	$P_{REF}$ Вт/мм	$P_{DISS}$ Вт/мм
8×35	30	12	172,03	21,07	30,63	11,68	9,56	7,37	4,13	3,70
6×70	30	12	241,71	24,68	32,10	11,25	7,42	6,91	3,86	3,74
6×100	30	12	322,39	25,57	33,18	10,72	7,61	6,45	3,47	3,58

Процесс нитрида галлия на кремнии, о котором идет речь в этой статье, обеспечивает ширину затвора 100 нм и регенерированные омические контакты. Они защищены несколькими слоями нитрида кремния (SiN) и диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>), что в результате позволяет осуществлять корпусировку в пластиковый корпус и значительно снижает стоимость конечной продукции.

При использовании этой технологии у разработчиков имеется возможность использовать два значения плотности МДМ-конденсаторов (400 и 50 пФ/мм<sup>2</sup>), два типа сопротивления (40 и 400 Ом). Кроме того, технология обеспечивает толстое металлическое покрытие в местах отверстий через подложку для надежного радиочастотного заземления. При использовании кремния с высоким удельным сопротивлением удается уменьшить влияние потерь на подложке по сравнению с арсенидом галлия, поскольку потери 1-мм копланарной линии составляют 0,3 дБ/мм на частоте 30 ГГц.

Основные технические характеристики процесса представлены в табл. 1. Для проектирования МИС компания OMMIC через своего дистрибьютора в России — «НПК Фотоника» — передает библиотеки данных (Procession Design Kit, PDK) со всей необходимой информацией и макетами для проектирования микросхем. Предлагаемые библиотеки включают в себя транзисторную электротермическую нелинейную модель, масштабированные модели всех пассивных элементов. Кроме того, предлагаются шумовые модели и модели ключей, что позволяет создавать многофункциональные схемы для сетей Massive MIMO 5G.

Разработка усилителя мощности на таких частотах предусматривает решение двух задач:

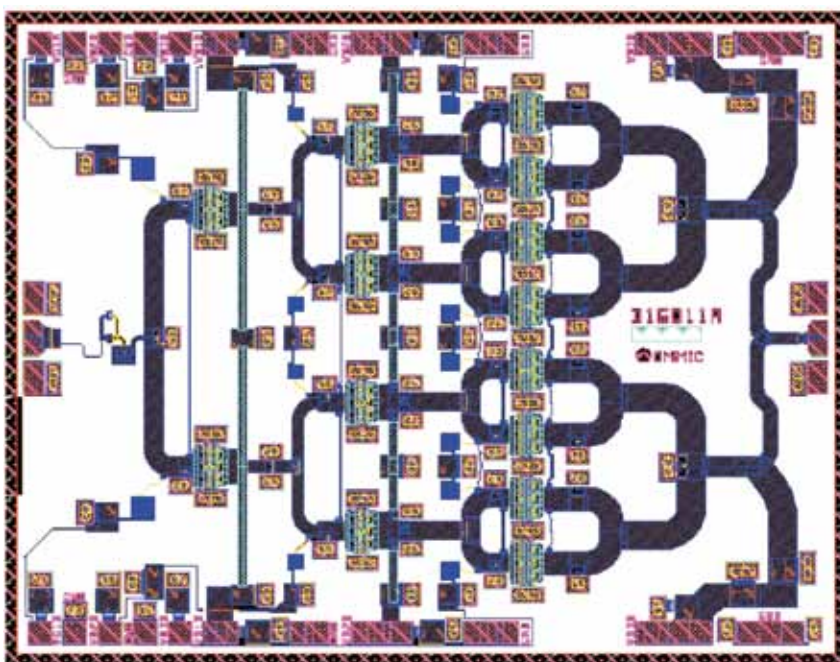
- частота 40 ГГц является достаточно высокой для процесса на нитриде галлия; при этом требуется, чтобы усиление было не менее 20 дБ, а выходная мощность составила 10–12 Вт;
- обеспечить контроль над рассеиваемой мощностью с учетом подложки из кремния, у которой более высокое тепловое сопротивление, чем у карбида кремния, в т. ч. выполнить требования к надежности, предъявляемые к сетям пятого поколения.

При проектировании интегральных схем следует учитывать, что на сверхвы-

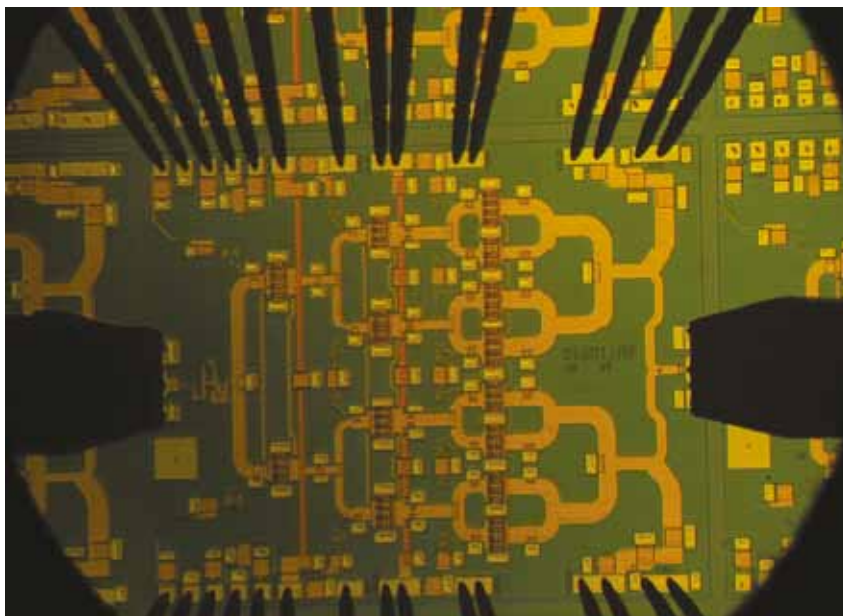
соких частотах параметры транзистора ограничены: импеданс соединения истока со сквозными отверстиями составляет около 5 Ом, а индуктивность — 20 пГн на частоте 40 ГГц. Для сравнения: сопротивление истока транзистора равно 0,2 Ом·мм. Из-за последовательной обратной связи коэффициент усиления уменьшается.

Для обеспечения приемлемого уровня компрессии была выбрана транзи-

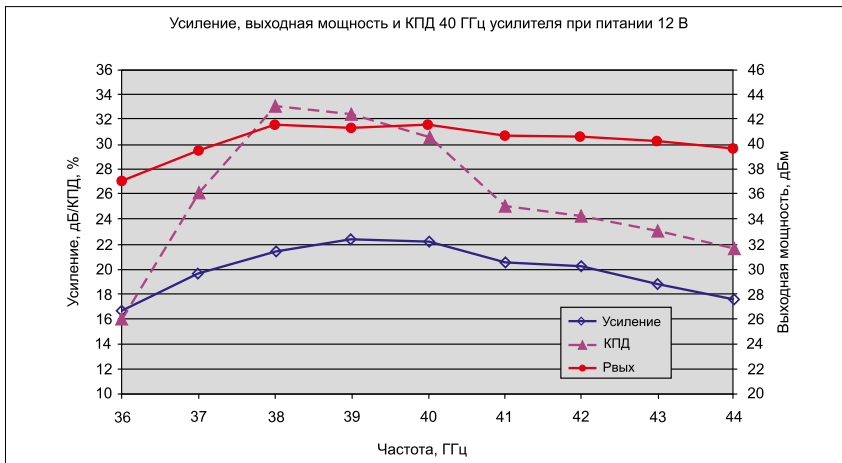
сторная ячейка размером 8×65 мкм = 520 мкм с помощью симуляции, чтобы обеспечить небольшое усиление сигнала, по меньшей мере, 8 дБ в условиях оптимального согласования мощности и режима работы класса АВ. В конечном счете, при мощности 3,3 Вт/мм и потерях 1 дБ выходная мощность величиной 10 Вт обеспечивается путем использования комбинации из восьми транзисторов в выходном каскаде.



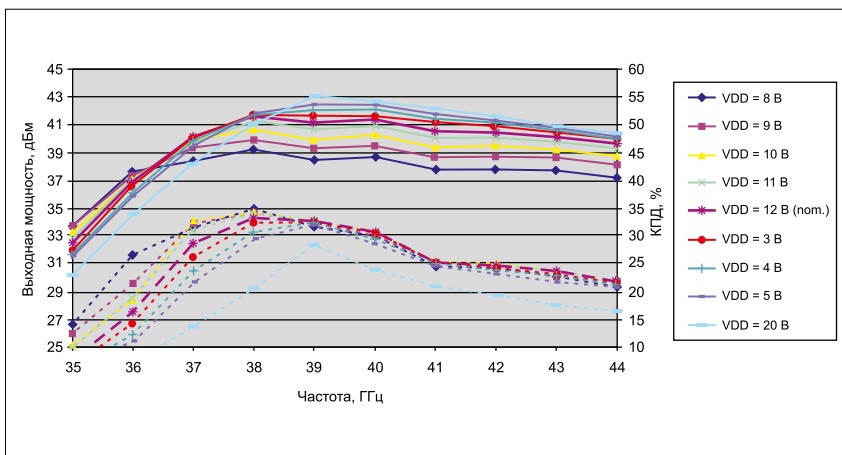
▲ Рис. 2. Топология 40-ГГц усилителя мощности на нитриде галлия



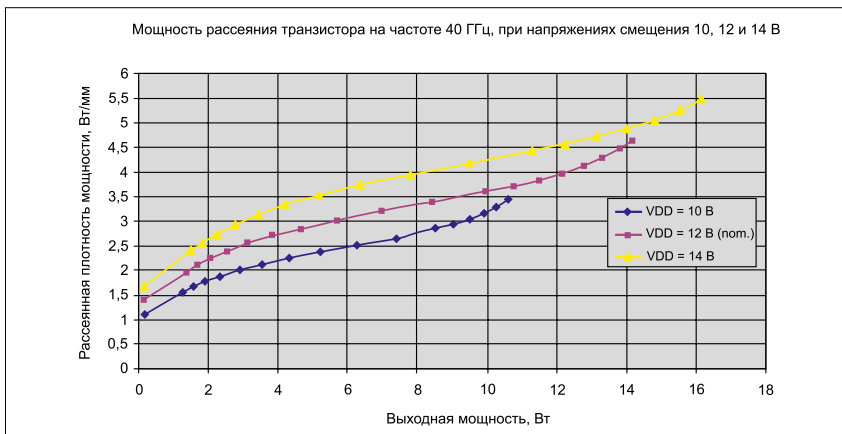
▲ Рис. 3. Фотография кристалла на пластине



▲ Рис. 4. Зависимость основных параметров от изменения частоты



▲ Рис. 5. Измерения выходной мощности и КПД с различным напряжением смещения



▲ Рис. 6. Мощность рассеяния транзистора на частоте 40 ГГц при напряжении смещения 10, 12 и 14 В

Для транзистора такого размера максимальная рассеиваемая плотность мощности для поддержания точки максимальной температуры 200 и 80 °С на тыльной стороне составляет приблизительно 3,5 Вт/мм. При такой температуре средняя наработка на отказ (МТТФ) равна 1 млн ч. Рассеиваемая мощность определяется следующей формулой:

$$P_{DISS} = P_{DC} + P_{IN} - P_{OUT}$$

где  $P_{DISS}$  — рассеиваемая мощность;  $P_{DC}$  — мощность постоянного тока;

$P_{IN}$  — входная мощность;  $P_{OUT}$  — выходная мощность транзистора.

На рис. 1 показаны результаты изменения нагрузки транзистора размером 6×70 мкм на частоте 30 ГГц. Заметим, что показатель КПД = 49% учитывает входную мощность, а не только эффективность стока. Данные в табл. 2 приведены для рассеиваемой мощности около 3,5 Вт/мм.

Таким образом, можно сделать вывод о корректности предположений при выборе размера транзистора для усилителя, работающего на частоте 40 ГГц.

Принимая во внимание потери и выходную мощность, использовалась трехкаскадная топология, обеспечившая усиление 20 дБ. Для упрощения монтажа контактные площадки затворов были размещены рядом друг с другом, чтобы позволить коммутировать их без дополнительных переходов. Такая же схема использовалась для контактных площадок стока. Каждый отдельный каскад был рассчитан так, чтобы он был стабильным для каждой точки смещения вдоль линии нагрузки до максимальной частоты отсечки транзистора. Финальная компоновка показана на рис. 2, 3. Размеры схемы: 3,6×2,8 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ МИС

После изготовления МИС измерялась непосредственно на пластине с использованием СВЧ-зондов. Поскольку термический контакт на заднюю часть пластины невелик, испытания проводились в импульсном режиме с длительностью импульса 9 мкс и коэффициентом заполнения 1%.

Как видно из рис. 4, измеренное значение усиления составило 20 дБ в диапазоне 37–42 ГГц. Выходная мощность превысила 41,3 дБм (13,5 Вт) в диапазоне 38–40 ГГц. При выходной мощности 32 дБм КПД составляет 11%. Рекомендуемое производителем напряжение смещения — 12 В.

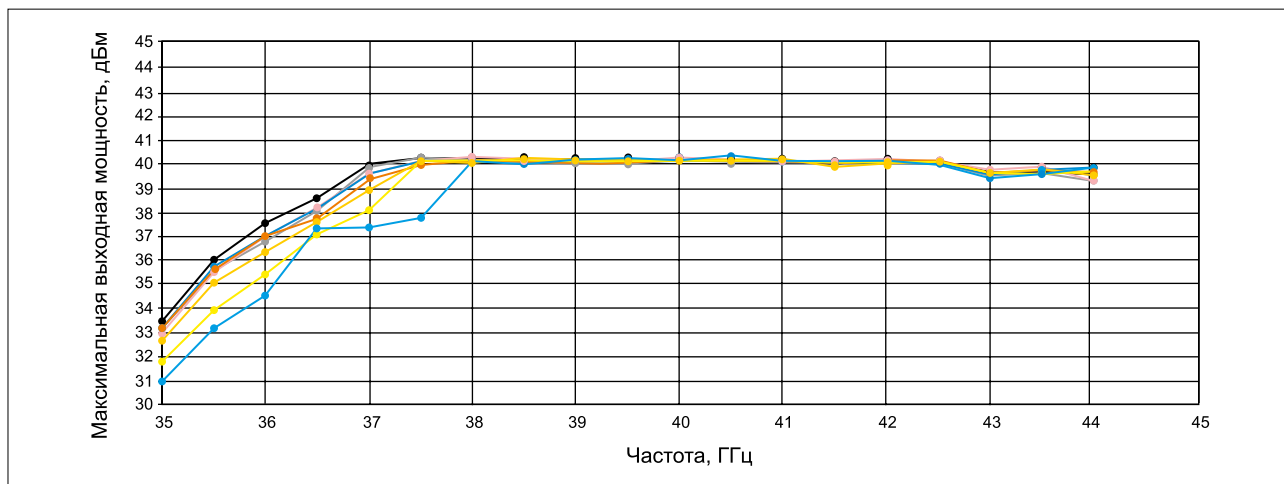
Хотя рекомендуемое напряжение смещения равно 12 В, исследования также проводились для напряжений 8–15 В и 20 В. Как видно из рис. 5, выходная мощность растет вместе с напряжением питания. Рассеиваемая мощность транзистора показана на рис. 6 для 10, 12 и 14 В.

Как видно, требуемая величина выходной мощности 10 Вт была достигнута уже при значении 10 В с рассеиваемой плотностью 3,2 Вт/мм, что дает значительный запас для термического управления конечным изделием. Для обеспечения более высокой плотности рассеиваемой мощности при более коротком сроке службы выходная мощность 15 Вт достигается на частоте 40 ГГц при рассеиваемой мощности 5 Вт/мм.

Как видно из графиков, проектирование усилителей с использованием технологии D01GH дает положительный результат, а выходные требования усилителя соответствуют требованиям, предъявляемым к современным МИС.

Одним из усилителей мощности, созданных на основе GaN/Si, является CGY2651UH/C1. У этого усилителя следующие характеристики:

- частотный диапазон: 38–44 ГГц (см. рис. 7);



▲ **Рис. 7.** Зависимость выходной мощности от частоты CGY2651UH/C1

- выходная мощность: 40 дБм (10 Вт);
- коэффициент усиления: 20 дБ;
- КПД: 25%;
- напряжение смещения: 12 В.

Официальным дистрибьютором компании ОММІС в России является научно-производственная компания «Фотоника». Компания «Фотоника» за-

нимается не только поставкой элементной базы ОММІС, но также разработкой и контрактным производством МИС по технологиям ОММІС. ●