

Быстрый синтез схемного решения GaAs СВЧ ИС ступенчатого аттенюатора с фазовой коррекцией в интеллектуальной программе 50ohm Tech Circuit Studio

Александр Метель, Игорь Добуш, Алексей Калентьев, Андрей Сальников, Александр Горяинов (50ohm Technologies, info@50ohm.tech)

Применение методов искусственного интеллекта (ИИ) – перспективная стратегия для ускорения разработки СВЧ интегральных схем (ИС). В статье демонстрируется работа интеллектуальной программы 50ohm Tech Circuit Studio – она позволяет за считанные минуты синтезировать схемное решение СВЧ ИС одноразрядного ступенчатого аттенюатора с фазовой коррекцией по комплексу требований к электрическим характеристикам на технологическом процессе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ (АО «Светлана-Рост»). Статья подготовлена при реализации проекта №23-91-06401 за счет средств гранта РНФ и АО «Светлана-Рост».

Введение

СВЧ интегральные схемы (ИС) на основе АЗВ5-материалов (GaAs, GaN, InP) широко применяются для построения радиочастотных трактов приёмопередающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решёток (АФАР). Процесс разработки СВЧ ИС для ППМ АФАР является итерационным, включает множество этапов и требует колоссальных трудозатрат команды высококвалифицированных разработчиков. По экспертным оценкам, среднее время проектирования однофункциональной СВЧ ИС составляет 2–4 месяца и распределяется примерно поровну на разработку схемного и топологического решения.

Многообещающей стратегией для повышения производительности труда и сокращения сроков разработки СВЧ ИС является применение методов искусственного интеллекта (ИИ) [1].

К середине 2020-х годов появились первые программные продукты [2–5], позволяющие по комплексу требований к электрическим характеристикам осуществить генерацию (синтез) схемного и/или топологического решения СВЧ ИС на заданном технологическом процессе.

В настоящей статье представлен пошаговый пример разработки СВЧ ИС одноразрядного ступенчатого аттенюатора (СА) с фазовой коррекцией на отечественном технологическом процессе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург). Синтез схемного решения по комплексу требований к электрическим характеристикам реализуется в интеллектуальной программе 50ohm Tech Circuit Studio [5] и позволяет сократить длительность данного этапа проектирования с нескольких дней до нескольких часов/минут.

В результате синтеза программа предлагает множество подходящих под заданные требования схемных решений, отличных по структуре и параметрам, которые инженер-разработчик может проанализировать и выбрать наиболее перспективные для дальнейшей реализации в топологии.

Постановка задачи

Разработка СВЧ ИС одноразрядного СА с фазовой коррекцией представляет собой многокритериальную задачу, в рамках которой требуется одновременно обеспечить комплекс требований к электрическим характеристикам (уровни вносимого ослабления и коэффициента передачи в опорном состоянии ($|S_{21}|_{\text{опорн}}$), коэффициенты отражения по входу ($|S_{11}|$) и выходу ($|S_{22}|$), допустимые ошибки по ослаблению и фазе) в широком диапазоне частот на заданном технологическом процессе. Дополнительную сложность представляет многообразие возможных схемных решений данного класса устройств, отличающихся структурой, количеством коммутационных элементов (КЭ) и способами компенсации фазовой ошибки между опорным состоянием и состоянием ослабления.

В качестве примера рассмотрим разработку СВЧ ИС одноразрядного СА с фазовой коррекцией и вносимым ослаблением 16 дБ на основе 0,25 мкм GaAs рНЕМТ (АО «Светлана-Рост»).

Синтез схемного решения: требования и ограничения

В табл. 1 приведены требования к основным характеристикам СВЧ ИС СА, при этом высокие значения для коэффициентов отражения обусловлены возможностью последующей интеграции разряда 16 дБ в состав многоуровневого СА. Это позволит уменьшить

Таблица 1. Требования и характеристики СВЧ ИС СА 16 дБ

	Требования	Решение 1	Решение 2	Решение 3	Решение 4	Решение 5
Δf , ГГц	0,5–20	0,5–20	0,5–20	0,5–20	0,5–20	0,5–20
$ S_{21} _{\text{опорн}}$, дБ	$> -2,5$	-1,32	-1,48	-1,41	-1,35	-1,65
$ S_{11} $, дБ	< -20	-20,87	-20,40	-20,07	-20,64	-20,67
$ S_{22} $, дБ	< -20	-20,60	-20,40	-20,07	-20,64	-20,67
Ошибка ослабления, дБ	$\pm 0,15$	0,04	0,09	0,11	0,11	-0,09
Фазовая ошибка, град	± 5	12,55	4,45	4,21	4,32	1,93
$P_{\text{вх1дБ}}$, дБм	> 20	18,03	21,29	20,99	21,64	22,39

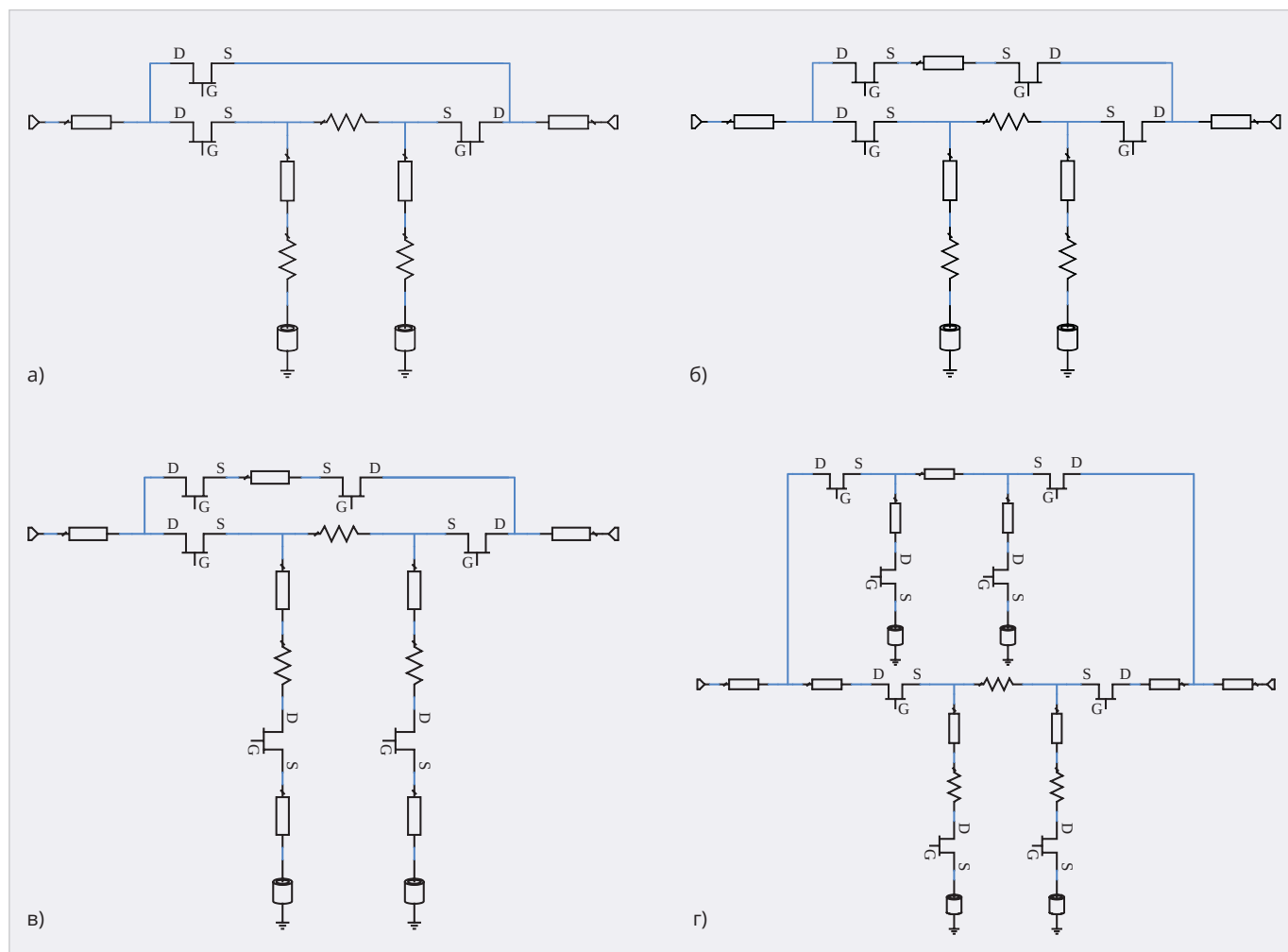


Рис. 1. Синтезированные схемы: а) решение 1; б) решение 2; в) решение 3; г) решение 4

взаимные переотражения при каскадировании разрядов, которые приводят к ухудшению амплитудно-фазовых характеристик аттенуатора в целом. В отличие от традиционного ручного проектирования, в котором инженер-разработчик последовательно анализирует ограниченное количество заранее известных схемных решений, используемый подход обеспечивает автоматическое исследование существенно более обширного пространства возможных структур за минимальное время.

Синтез схемного решения: анализ и обсуждение результатов

После задания исходных требований было выполнено несколько запусков процедуры синтеза. В результате работы программы 50ohm Tech Circuit Studio получено множество решений, которые отличаются электрическими характеристиками, количеством КЭ и сложностью структур для последующей топологической реализации. На рис. 1а–г приведены некоторые из синтезиро-

ванных схем, а в табл. 1 представлены их основные характеристики.

Решение 1 содержит 3 КЭ, отличается наименьшими вносимыми потерями, наиболее просто в последующей доработке и имеет минимальные габариты, но не удовлетворяет требованиям по фазовой ошибке и уровню входной мощности при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ ($P_{\text{вх1дБ}}$). Остальные решения обеспечивают выполнение всех требований, однако предполагают более сложные структуры и большее количество КЭ. Таким образом, результаты синтеза показали, что увеличение количества КЭ позволяет уменьшить фазовую ошибку, но приводит к усложнению схемы и потенциально к росту площади кристалла.

В некоторых случаях программа синтеза генерировала структуры с элементами, незначительно влияющими на характеристики устройства, например, короткими отрезками линий передачи. Такие элементы считались избыточными: они либо служили основанием для дополнительных ограничений

на структуру схемы, либо исключались на этапе подготовки топологии.

При выборе схемного решения учитывались не только электрические характеристики, но и факторы, влияющие на топологическую реализацию устройства: сложность трассировки и доработки топологии, а также ожидаемую устойчивость параметров после электромагнитного анализа (ЭМ-анализа). Некоторые решения, несмотря на удовлетворительные электрические характеристики, содержали структуры, неудобные для трассировки. Это могло привести к увеличению площади кристалла и росту паразитных связей. Из-за этого итоговые характеристики после разработки топологии и ЭМ-анализа могли существенно отличаться от результатов синтеза.

Таким образом, окончательный выбор схемного решения базировался не только на формальном соответствии установленным требованиям к электрическим характеристикам, но и на комплексной оценке практических факторов, влияющих на последующую реализацию устройства.

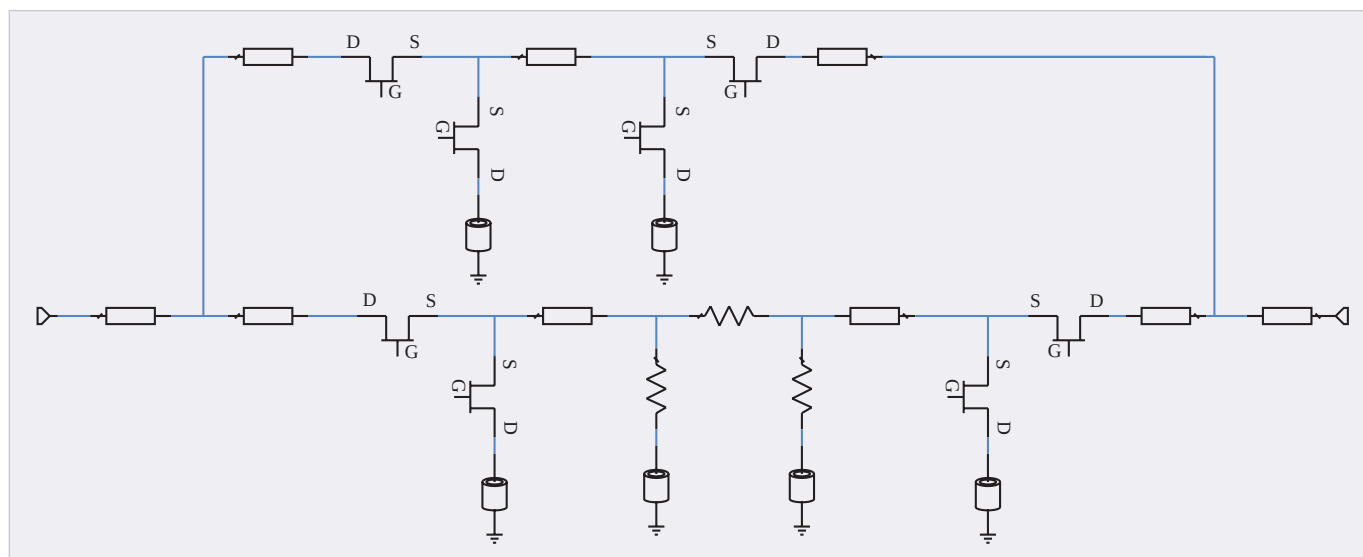


Рис. 2. Синтезированная схема (решение 5)

Синтез схемного решения: ужесточение требований

Одной из особенностей рассматриваемого подхода является возможность итеративного уточнения требований к устройству. По результатам анализа схемных решений, полученных при первых запусках программы синтеза, было принято решение ужесточить ряд требований для создания дополнительного запаса характеристик, в том числе: $|S_{21}|_{\text{опорн}}$ – не менее –2 дБ, ошибка ослабления – не более 0,1 дБ, фазовая ошибка – не более 2,5 град. Необходимость этого обусловлена возможным ухудшением параметров устройства после разработки топологии, ЭМ-анализа и изготовления.

Для получения более компактных решений были наложены дополнительные ограничения на диапазоны варьирования геометрических параметров элементов, участвующих в синтезе: ширина транзисторов от 25 мкм до 65 мкм, количество затворов от 2 до 6, ширина тонкоплёночных резисторов от 40 мкм до 80 мкм.

Следует отметить, что итеративное изменение требований и повторный запуск процедуры синтеза позволяют быстро получать новые схемные решения. По результатам нескольких запусков была выбрана схема (рис. 2), обеспечивающая наилучший компромисс между электрическими характеристиками (табл. 1, решение 5) и сложностью последующей топологической реализации.

В данной задаче один запуск программы синтеза в автоматическом режиме для 5000 итераций занимал менее 2 минут. Полный цикл анализа

линейных и нелинейных характеристик инженером-разработчиком всего множества решений, а также выбор итоговой схемы для дальнейшей реализации в топологии потребовали около 4 часов. На рис. 3б–е синей линией показаны частотные характеристики данного синтезированного решения.

Разработка топологии

На рис. 3а представлена разработанная топология СВЧ ИС СА 16 дБ. Для уменьшения габаритов кристалла были выполнены следующие действия: отрезки входной и выходной линии передачи свёрнуты в виде меандров; все заземляющие отверстия на стоках транзисторов объединены в одно. Наличие отрезков линий передачи упрощает интеграцию разряда 16 дБ в состав многоразрядного СА и обеспечивает большую гибкость компоновки, что дополнительно способствует уменьшению общих габаритов аттенюатора. На входе и выходе СА были добавлены контактные площадки и дополнительные отрезки линий передачи для выполнения процедуры L2L-деэмбеддинга.

Резисторы в цепях управления были расположены максимально близко к затворам транзисторов для снижения взаимовлияния СВЧ-тракта и тракта управления. Их размеры выбраны в соответствии с рекомендациями фабрики-изготовителя. Ввиду малых токов, протекающих по данным цепям, трассировка была выполнена в одном слое металлизации.

После завершения разработки топологии был выполнен 2,5D ЭМ-анализ, результаты которого показали необхо-

димость дополнительной коррекции длин отрезков линий передачи для сохранения соответствия с характеристиками схемного решения, полученного в программе 50ohm Tech Circuit Studio. Наибольшее влияние на изменение характеристик (увеличение фазовой ошибки) оказало объединение сквозных отверстий и возникновение паразитных связей в линиях передачи. Общее время разработки топологии, включая её коррекцию и проведение двухкратного ЭМ-анализа, составило менее 24 часов. На рис. 3б–е оранжевой линией показаны частотные характеристики ЭМ-анализа финальной топологии.

Изготовление и измерения

Топология СВЧ ИС одноразрядного СА с фазовой коррекцией была изготовлена по технологическому процессу 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост») и измерена на зондовой станции. На рис. 3б–е зелёной линией показаны измеренные частотные характеристики типового кристалла из выборки после L2L-деэмбеддинга.

Заключение

В статье представлен пошаговый пример разработки СВЧ ИС одноразрядного ступенчатого аттенюатора с фазовой коррекцией. Рассмотрены основные этапы: постановка задачи и уточнение требований, синтез и анализ схемных решений, разработка топологии, изготовление и измерения. Показано, что применение интеллектуальной программы 50ohm Tech Circuit Studio позволяет выполнить синтез схемного решения

Circuit Studio

50ohm Tech Circuit Studio – программная платформа для автоматизированного проектирования схемных решений, расширяемая модулями для синтеза целевых типов устройств:

- **LNA Designer** – синтез малошумящих усилителей (МШУ)
- **DSA Designer** – синтез секций ступенчатых аттенюаторов (СА)
- **DSP Designer** – синтез секций ступенчатых фазовращателей (СФ)
- **SW Designer** – синтез двухканальных коммутаторов

В чем отличие нашего решения?

Circuit Studio является САПР нового поколения, использующей методы искусственного интеллекта для поиска решения. Проектировщику необходимо задать требования к синтезируемому устройству, а программа сама найдет схемное решение под требуемый техпроцесс

1 Синтез структуры

Автоматическая генерация (синтез) структуры и параметров схемы СВЧ ИС на основе методов искусственного интеллекта позволяет получать рациональные, физически реализуемые схемные решения

2 Комплекс требований

Учет комплекса требований к электрическим характеристикам – коэффициенты передачи (усиления) и отражения по входу и выходу, коэффициенты шума и устойчивости. С помощью весов вы можете задать нужный компромисс для поиска оптимального решения

3 PDK фабрики

Синтез выполняется с использованием моделей элементов PDK фабрики. Вы получаете схему с элементами, для которых указаны значения их геометрических параметров

4 Множество решений

В результате синтеза программа предлагает множество решений, отличных по структуре и параметрам, подходящих под заданные требования

5 Быстрое моделирование

Алгоритм моделирования S-параметров и шумовых параметров разработан специально для структур МШУ, СА и СФ, что делает его быстрее, чем алгоритмы моделирования в традиционных САПР

6 Интеграция с САПР

Бесшовная интеграция с традиционными САПР СВЧ-устройств полного цикла проектирования позволит продолжить работу с полученными решениями в привычных для вас инструментах

Запишитесь на демо

Наши специалисты покажут вам, как ускорить процесс проектирования и улучшить качество получаемых решений:
info@50ohm.tech



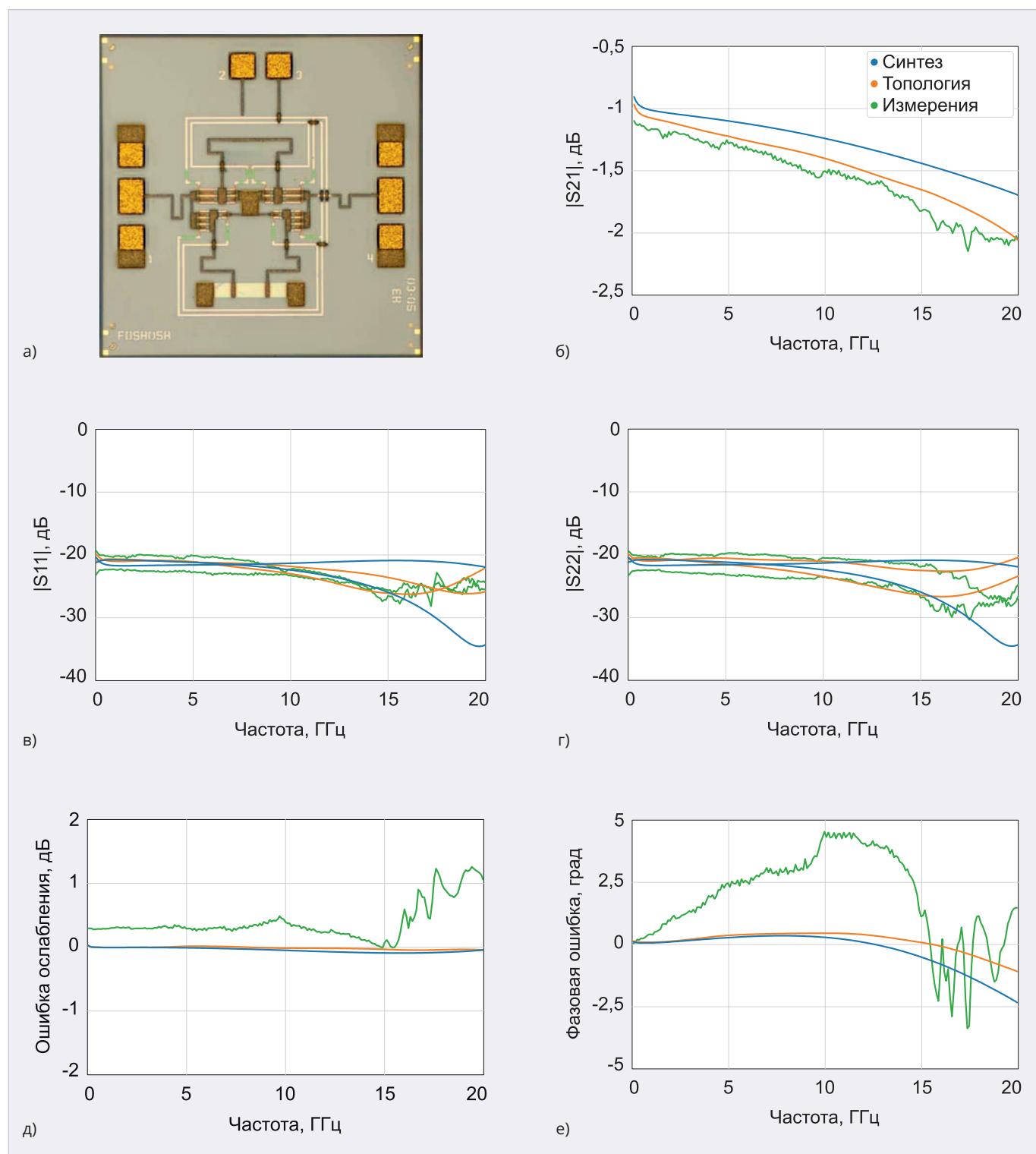


Рис. 3. СВЧ ИС СА 16 дБ: а) топология кристалла; б) $|S_{21}|_{\text{опорн}}$; в) $|S_{11}|$; г) $|S_{22}|$; д) ошибка ослабления; е) фазовая ошибка

одноразрядного ступенчатого аттенюатора за считанные минуты по комплексу требований к электрическим характеристикам на реальном технологическом процессе (0,25 мкм GaAs рНЕМТ, АО «Светлана-Рост»). Кроме того, программа предлагает множество схемных решений, отвечающих заданным требованиям и различающихся по структуре и параметрам, из которых инженер-разработчик может выбрать наиболее перспек-

тивные для реализации в топологии с обеспечением запаса по основным характеристикам.

Литература

1. Горяинов А.Е., Добуш И.М., Калентьев А.А. и др. 50ohm Tech Circuit Studio – платформа для автоматизированного проектирования схемных решений СВЧ интегральных схем с применением методов ИИ // Электроника СВЧ. 2025. № 2.

2. RapidRF [Электронный ресурс]. URL: <https://rapidrf.ai/> (дата обращения: 22.06.2026).
3. ZapRF [Электронный ресурс]. URL: <https://zaprf.com/> (дата обращения: 22.06.2026).
4. Gandalph.ai [Электронный ресурс]. URL: <https://gandalph.ai/> (дата обращения: 22.06.2026).
5. 50ohm Tech Circuit Studio [Электронный ресурс]. URL: <https://50ohm.tech/ru/circuit-studio> (дата обращения: 22.06.2026).

