

Результаты зондовых измерений интегральной схемы дискретного 6-разрядного аттенюатора X-диапазона частот, разработанной на основе технологического процесса GaAs pHEMT 0,5 мкм

А.М. Кулиш^{1,2}, В.В. Лосев¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

²АО «Микроволновые системы»,

Аннотация: в данной работе представлен процесс проектирования 6-ти разрядного дискретного аттенюатора X-диапазона на отечественном техпроцессе GaAs pHEMT GA05-D-L-01. Согласно результатам моделирования, применённая методика коррекции паразитного фазового сдвига позволила снизить среднеквадратичное отклонение по фазе до 1,7°–3,4° при ошибке по амплитуде 0,16–0,27 дБ. Описана методика подготовки к зондовым измерениям с использованием зондовой станции и векторного анализатора цепей. Сравнение результатов моделирования и измерений будет представлено в докладе.

Ключевые слова: СВЧ, интегральная схема, дискретный аттенюатор, GaAs pHEMT, АФАР

1. Введение

Разработка приёмо-передающих модулей (ППМ) для систем активных фазированных антенных решёток (АФАР) X-диапазона частот требует высокоточных узлов управления амплитудой сигнала, в частности дискретных аттенюаторов с минимальным паразитным фазовым сдвигом [1]. Важной задачей в процессе создания таких интегральных схем (ИС) является верификация отечественного технологического процесса GA05-D-L-01 компании АО «Светлана-Рост», в основе которого лежат GaAs псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (pHEMT) с длиной затвора 0,5 мкм.

В докладе представлены результаты проектирования и методика подготовки к экспериментальному исследованию СВЧ ИС 6-ти разрядного аттенюатора, изготовленной в рамках сервиса MPW (Multi-Project Wafer), организованного НИУ МИЭТ.

2. Состав библиотеки элементов технологического процесса GA05-D-L-01

Проектирование ИС аттенюатора X-диапазона частот выполнено с использованием библиотеки стандартного GaAs pHEMT технологического процесса GA05-D-L-01 с проектной нормой 0,5 мкм компании АО «Светлана-Рост». Библиотека содержит параметризованные модели pHEMT-транзисторов для усилительных и коммутационных ИС с граничной частотой 36 ГГц, диодов Шоттки, а также набор пассивных элементов: тонкоплёночные и объёмные резисторы, конденсаторы со структурой металл-диэлектрик-металл (МДМ), планарные катушки индуктивности и микрополосковые линии. Особое значение для реализации ИС аттенюатора имеют модели транзисторов в режиме управляемого сопротивления канала, учитывающие зависимости сопротивления канала и ёмкостей от управляющего напряжения на затворе. Статистические модели процесса, верифицированные ранее [2], позволяют сформировать проектные запасы по параметрам вносимого ослабления и фазового сдвига.

3. Процесс проектирования ИС 6-ти разрядного дискретного аттенюатора X-диапазона частот

МИС аттенюатора содержит шесть секций ослабления 0,5 дБ, 1,0 дБ, 2,0 дБ, 4,0 дБ, 8,0 дБ и 16,0 дБ, что обеспечивает диапазон регулировки амплитуды от 0 до 31,5 дБ с минимальным шагом 0,5 дБ (64 состояния). Управление разрядами осуществляется подачей постоянных потенциалов $V_{УПР.} = 0 \text{ В} / -5 \text{ В}$ на затворы транзисторов через высокоомные изолирующие резисторы с номиналом 10 кОм.

Младшие разряды аттенюатора (0,5 дБ и 1,0 дБ) реализованы на основе вырожденных структур с одним последовательным транзистором и параллельной цепью ослабления, что позволяет оптимизировать занимаемую площадь на кристалле при достижении низких коэффициентов отражения и потерь в опорном состоянии. Секция с вносимым ослаблением в 2,0 дБ построена с использованием упрощённой структуры фильтра высоких частот (ФВЧ) с резистивной цепью, где периферия затвора ключевых транзисторов выбрана для достижения низких коэффициентов отражения и частотной равномерности вносимого ослабления. В разрядах 4,0 дБ и 8,0 дБ применены мостовые Т-образные структуры аттенюаторов, а секция 16,0 дБ реализована на основе двухпозиционных коммутаторов, переключающих сигнал между опорным плечом с вносимым затуханием 3,0 дБ и П-образным плечом ослабления.

Для минимизации фазовых искажений при переключении состояний секций в структуру разрядов введены ёмкостные корректирующие цепи, подключенные параллельно резистивным элементам ослабления. Физический принцип основан на создании дополнительной фазовой задержки, компенсирующей исходное опережение по фазе в состоянии вносимого ослабления. Введение коррекции позволило уменьшить паразитный фазовый сдвиг на 1° для секции 0,5 дБ, на $1,5^\circ$ для секции 4,0 дБ и на 16° для секции 16,0 дБ на частоте 10 ГГц.

На этапе проектирования топологии проведено электромагнитное моделирование пассивных элементов ИС аттенюатора для учёта паразитных электромагнитных взаимодействий между элементами, резистивных потерь и паразитных реактивностей, оказывающих влияние на качество характеристик устройства. Порядок следования секций оптимизирован для достижения минимальной неравномерности частотных зависимостей коэффициента передачи и минимального отклонения по фазе.

Согласно результатам моделирования ИС аттенюатора в диапазоне частот 8-12 ГГц потери в опорном состоянии составили 10,0 дБ, потери на отражение по входу/выходу менее -11,5 дБ, среднеквадратичное отклонение (СКО) по амплитуде и фазе, методика расчета которого представлена в [3], составило 0,16 - 0,27 дБ и $1,7^\circ$ - $3,4^\circ$, соответственно. Площадь кристалла ИС аттенюатора $3,8 \times 5,6 \text{ мм}^2$.

4. Методика экспериментального исследования

Для экспериментальной верификации характеристик изготовленной ИС аттенюатора подготовлен измерительный стенд на базе зондовой станции. Измерения параметров матрицы рассеяния (S-параметров) планируется проводить с использованием векторного анализатора цепей. Контактное взаимодействие с кристаллом осуществляется посредством зондовой станции с использованием СВЧ зондов типа Земля-Сигнал-Земля (GSG) с шагом 150 мкм и многоканальных зондов для подачи управляющих напряжений $0 \text{ В} / -5 \text{ В}$. Схема измерения S-параметров приведена на рисунке 1.



Рисунок 1. Схема измерения S-параметров ИС дискретного аттенюатора.

Калибровка измерительного тракта выполняется по методике TRL (Thru-Reflect-Load) с использованием калибровочных подложек для исключения влияния измерительного оборудования на характеристики исследуемой ИС.

Измерения S-параметров аттенюатора проводятся при следующих условиях:

- Мощность входного сигнала составляет минус 20 дБм для исключения работы ключевых транзисторов в нелинейном режиме;
- Температура окружающей среды составляет 27 °С, что соответствует нормальным климатическим условиям;
- Количество измеряемых состояний: 64 (все комбинации 6 разрядов);
- Шаг по частоте: 10 МГц в рабочем диапазоне частот 8-12 ГГц.

Для верификации нелинейных характеристик, а именно точки компрессии коэффициента передачи на 1 дБ в опорном состоянии аттенюатора, предусмотрен измерительный стенд с векторным генератором сигналов и анализатором мощности, однако в рамках доклада основное внимание уделяется линейным S-параметрам.

Обработка измеренных данных включает расчёт и сравнение с результатами электромагнитного моделирования частотных зависимостей СКО по амплитуде и фазе, коэффициентов отражения по входу и выходу ($|S_{11}|$, $|S_{22}|$) и коэффициентов прохождения ($|S_{21}|$) во всех 64-х состояниях аттенюатора. Также, проводится оценка разброса параметров на выборке из нескольких кристаллов для учета статистической изменчивости технологического процесса.

На основе предыдущего опыта зондовых измерений ИС малошумящего усилителя (МШУ) с байпас-каналом, в котором также использованы ключевые транзисторы [4], ожидается, что измеренные коэффициенты $|S_{21}|$ превысят результаты моделирования на 0,25 - 1,5 дБ, а разброс значений между кристаллами в линейном масштабе составит 10 – 17 %.

5. Заключение

В работе представлена методика и результаты проектирования 6-ти разрядного дискретного аттенюатора X-диапазона частот на основе отечественного технологического процесса GA05-D-L-01. Применение ёмкостных корректирующих цепей в секциях аттенюатора позволило снизить паразитный СКО фазового сдвига до $1,7^{\circ}$ – $3,4^{\circ}$ при СКО ослабления 0,16–0,27 дБ в диапазоне 8–12 ГГц.

Описана методика экспериментальной верификации на базе зондовой станции с калибровкой TRL. На основе анализа результатов измерений аналогичных структур, изготовленных по такому же технологическому процессу, сформированы прогнозные

оценки точности моделирования: ожидаемое отклонение вносимых потерь от расчётных значений составит +0,25–1,5 дБ, разброс параметров между кристаллами — в пределах 10–17 %.

Полные результаты сравнения экспериментальных характеристик с данными моделирования будут представлены в докладе.

Работа выполнена в рамках соглашения №075-03-2026-239 от 16.01.2026 г. Код: FSMR-2026-0006.

Список литературы

1. Кулиш, А. М. 6-ти разрядный аттенуатор X-диапазона для применения в системах радиолокации / А. М. Кулиш, Ю. А. Чаплыгин, В. В. Лосев // Материалы 32 научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика – 2025»: сборник статей, Москва : МИЭТ, 2025. – С. 117-121. – ISBN 978-5-7256-1066-6. – EDN: ODERMU.
2. Методология и практика верификации инструментов проектирования (PDK) к стандартным технологическим процессам / О. Р. Фазылханов, И. С. Пушница, С. И. Стрельников [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2017) : Материалы 27-ой Международной Крымской конференции. В 9-ти томах, Севастополь, 10–16 сентября 2017 года. Том 1. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 143-149. – EDN YNKRZB.
3. Bahl, I. J. Control components using Si, GaAs, and GaN technologies. – London: Artech House, 2014. – P. 325.
4. Кулиш, А. М. Малошумящие усилители, изготовленные по технологическому процессу GA05-D-L-01 / А. М. Кулиш, О. Р. Фазылханов // Российский форум «Микроэлектроника-2025» Предконференция №1 «Доверенная и экстремальная электроника». – М. : Техносфера, 2025. – С. 15-16.