

# Применение схемы стабилизации затворного смещения в МИС собственной разработки

П.С. Сорвачев<sup>2</sup>, С.В. Миннебаев<sup>1</sup>, А.В. Кондратенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Микроволновые системы», г. Москва

<sup>2</sup>Обособленное подразделение АО «Микроволновые системы», г. Нижний Новгород

**Аннотация:** в докладе представлены примеры проектов многофункциональных МИС, где использование схемы стабилизации затворного смещения активных элементов позволило повысить выход годных кристаллов по критерию коэффициент усиления. Кроме того, приведена модифицированная схема стабилизации смещения с возможностью модуляции напряжения затвора. Все примеры проектов выполнены на основе технологического процесса 0,15 мкм GaAs рНЕМТ.

**Ключевые слова:** монолитная интегральная схема, транзистор с высокой подвижностью электронов, векторный модулятор, параметры рассеяния, схема стабилизации затворного смещения, модуляция по затвору, технологический процесс GaAs рНЕМТ.

## 1. Введение

Монолитные интегральные технологии в настоящее время получили широкое распространение, использование электронной компонентной базы (ЭКБ) высокой степени интеграции является трендом при построении приемо-передающих модулей (ППМ). Разработка и применение собственной ЭКБ в проектируемых модулях позволяет решить важную задачу оптимизации технических и экономических показателей всего проекта.

Разработка монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ-диапазона частот является сложной и трудоемкой задачей, порой невозможно на этапе расчета учесть все нюансы, например - технологический разброс параметров интегральных элементов на пластине и при серийном производстве. Из-за этого снижается выход годных и, как следствие, ухудшаются экономические показатели проекта. Одним из способов повышения выхода годных производимых МИС на пластине является использование схемы стабилизации затворного смещения для активных элементов усилителей.

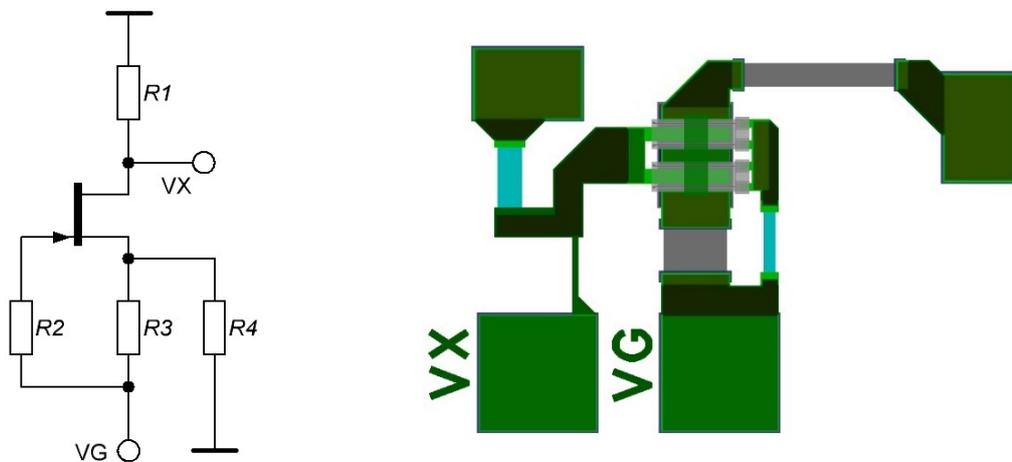
В докладе представлены результаты применения схемы стабилизации затворного смещения в GaAs МИС собственной разработки. Кроме того, приведена модифицированная версия схемы, позволяющая осуществить модуляцию напряжения затвора активного элемента усилителя. Работа велась в интересах внутренних подразделений, занимающихся проектированием и производством радиоэлектронных узлов, модулей и систем.

## 2. Краткое описание схемы стабилизации затворного смещения и ее применение в МИС собственной разработки

Схема стабилизации затворного смещения была разработана и изготовлена на основе технологического процесса, в основе которого лежат нормально открытые GaAs транзисторы с высокой подвижностью электронов, имеющие длину затвора 0,15 мкм. Рассматриваемая схема стабилизации затворного смещения не применялась как отдельный кристалл, в рамках внутренних проектов она была реализована в составе многофункциональных МИС.

На рисунке 1 изображена эквивалентная схема стабилизации затворного смещения активных элементов и топология [1]. Занимаемая схемой площадь на кристалле

составляет приблизительно  $300 \times 250$  мкм<sup>2</sup>.

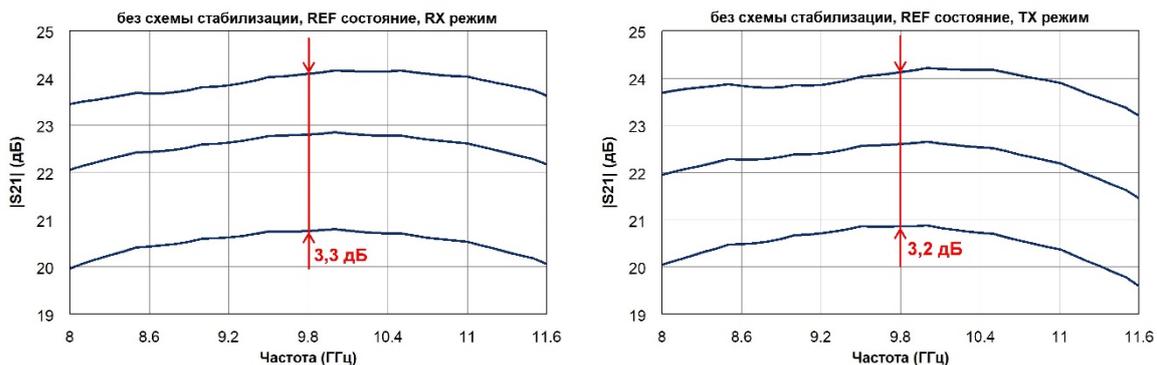


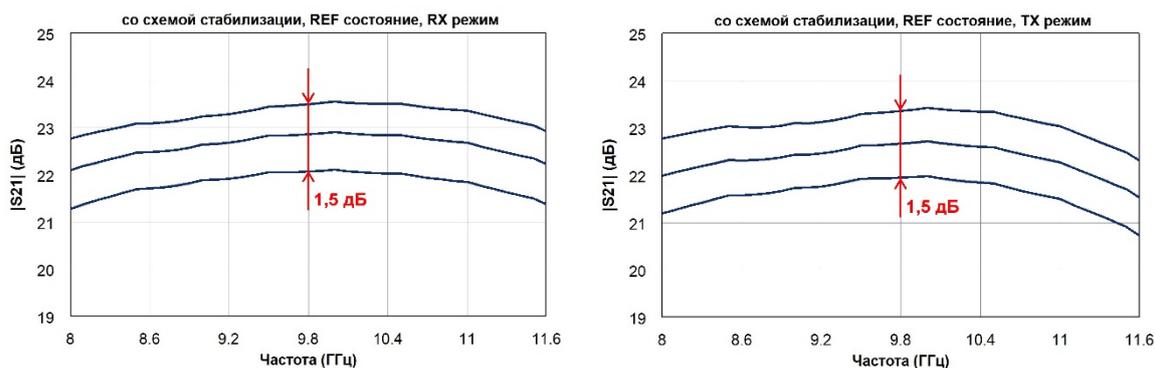
**Рисунок 1.** Эквивалентная схема стабилизации затворного смещения и топология.

При подаче отрицательного напряжения питания на контактную площадку VG на выводе VX формируется напряжение для затворного смещения. Схема позволяет снизить чувствительность напряжения смещения к технологическому разбросу напряжения отсечки транзистора, температурному режиму работы и внешнему напряжению питания схемы.

Первым примером использования разработанной схемы стабилизации затворного смещения является серийно выпускаемая МИС трех портового векторного модулятора (ВМ) MSP003D X-диапазона частот. Кристалл содержит в своем составе три двухпозиционных коммутатора, обеспечивающих переключение приемного и передающего режимов работы; малошумящий усилитель на входе приемного канала; 6-разрядный фазовращатель, 5-разрядный аттенюатор, а также два буферных усилителя в общем плече; предварительный усилитель мощности на выходе передающего канала; собственно, цепи стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей и цифровой драйвер управления с параллельным интерфейсом загрузки.

Для комплексной модели МИС MSP003D был проведен расчетный эксперимент, подтверждающий эффективность использования схемы стабилизации. Выведены частотные зависимости для усиления всего ВМ в режимах прием/передача при опорном состоянии работы аттенюатора и фазовращателя для двух случаев: без схемы стабилизации затворного смещения и с ее использованием при различных значениях напряжения отсечки транзистора от минус 1,15В до минус 0,85В с шагом 0,15В (Рисунок 2).

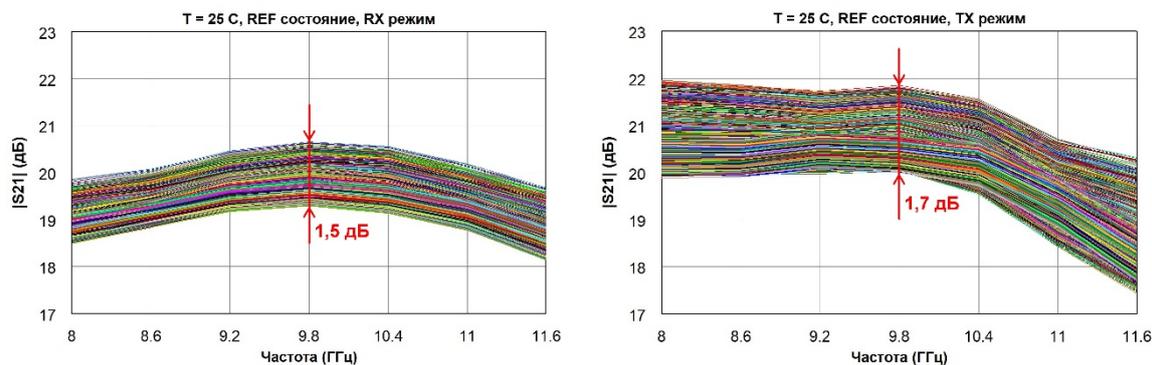




**Рисунок 2.** Расчетные частотные характеристики при вариациях напряжения отсечки транзистора для модели МИС MSP003D.

По результату моделирования видно сокращение разброса коэффициента усиления при использовании схемы стабилизации смещения на 1,5 дБ.

Также на основе измеренных данных была проведена разбраковка разработанной МИС MSP003D, общее количество кристаллов составило 4046 штук. Один из основных критериев для разбраковки кристаллов является коэффициент усиления. На рисунке 2 приведены измеренные частотные зависимости для коэффициента усиления ВМ в режимах прием/передача при опорном состоянии работы аттенюатора и фазовращателя для 3581 кристаллов. «Окно» разброса коэффициента усиления составило менее 2 дБ при этом выход годных получился 88%.



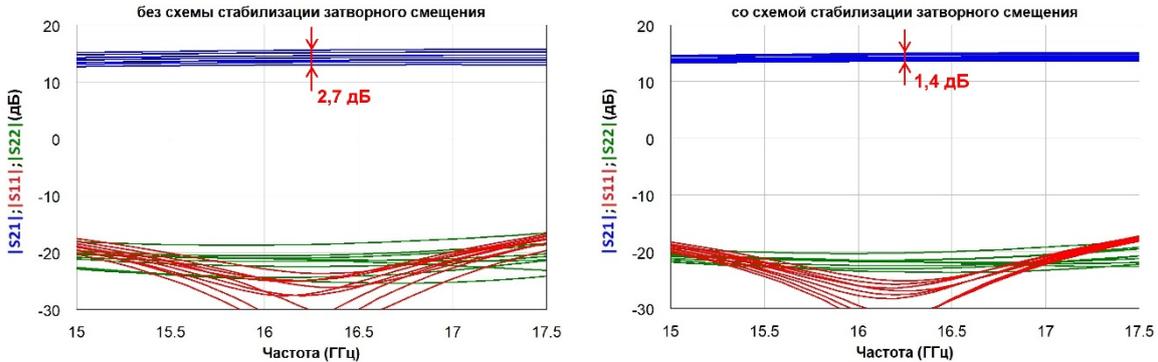
**Рисунок 2.** Измеренные частотные характеристики коэффициента усиления МИС MSP003D для режимов работы прием/передача.

Полученные экспериментальные результаты соответствуют значению монитора контроля технологического процесса для разброса напряжения отсечки транзисторов +/- 0,15В и совпадают с расчетом.

Вторым примером использования схемы стабилизации затворного смещения может служить МИС ВМ MSP010D Ku-диапазона частот. Кристалл разработан по той же технологии, что и МИС MSP003D и представляет собой трех портовую схему, содержащую в своем составе: систему коммутаторов; малошумящий усилитель на входе приемного канала; 6-разрядный аттенюатор; 6-разрядный фазовращатель; два буферных усилителя в общем плече; предварительный усилитель мощности на выходе передающего канала; 24-разрядный последовательно-параллельный драйвер управления, обеспечивающий загрузку данных; цепи стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей.

МИС MSP010D - новый проект в отличие от МИС MSP003D, и в данный момент нет большой выборки измеренных электрических параметров с пластины, поэтому эффективность используемой схемы стабилизации подтверждается по результатам

расчета частотных характеристик. Из проекта МИС ВМ был отдельно взят малошумящий усилитель без схемы стабилизации затворного смещения и с ее использованием при различных значениях напряжения отсечки транзистора от минус 1,15В до минус 0,85В и температуры окружающей среды от минус 60°C до 80°C (рисунок 3).

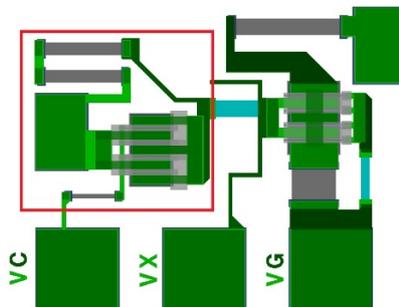


**Рисунок 3.** Расчетные частотные характеристики при вариациях напряжения отсечки и температуры.

Использование схемы стабилизации затворного смещения позволяет минимизировать разброс коэффициента усиления так же, как и для МИС MSP003D до 1,5 дБ.

Радиоэлектронные узлы и модули могут характеризоваться разными режимами работы, например - непрерывным, импульсным. Обычно применяемый способ получения импульсного сигнала - модуляция напряжения стоков СВЧ транзисторов (модуляция по стоку), которая обеспечивает устойчивую работу усилителя и хорошее подавление сигнала в паузе между импульсами. Однако, при данном способе модуляции требуется мощный ключевой транзистор, так как импульсный ток стока достигает больших значений, в то время, как при модуляции по затвору импульсный ток затвора значительно меньше. И тот и другой способ модуляции имеют свои преимущества и недостатки [2].

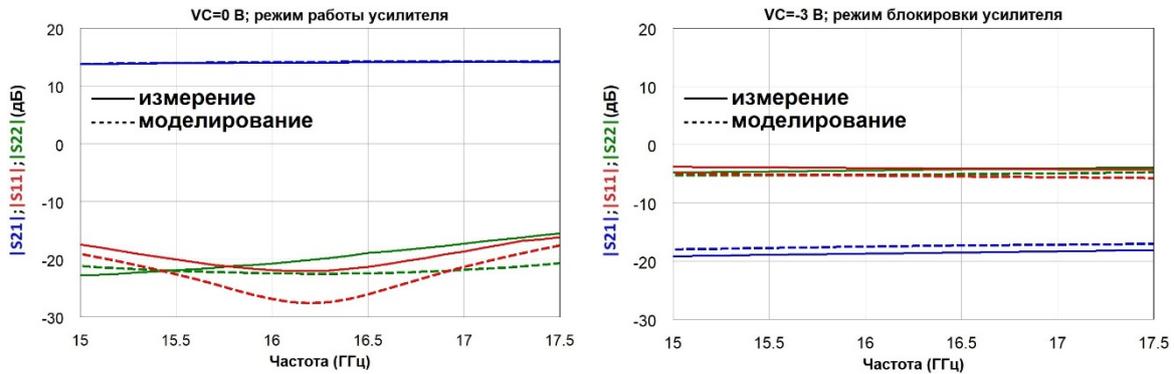
Как альтернативный вариант модуляции по стоку, на базе схемы стабилизации затворного смещения была проведена модификация, позволяющая осуществить модуляцию напряжения затвора активных элементов усилителей с сохранением стабилизирующих свойств схемы. На рисунке 4 изображена модифицированная топология.



**Рисунок 4.** Топология модифицированной схемы стабилизации затворного смещения.

Красным прямоугольником выделены дополненные элементы в топологии схемы стабилизации. Это полевой транзистор с затвором Шоттки, работающий в режиме управляемого сопротивления канала и шунтирующий резистор. На контактную площадку VC подается управляемое напряжение, которое определяет работу схемы

затворного смещения. Проверка функционирования представленной схемы была осуществлена на малошумящем усилителе из состава МИС MSP010D. Схема в сборе была изготовлена и измерена. Измеренные и расчетные частотные зависимости для  $V_C=0\text{В}$  (режим работы усилителя) и  $V_C=-3\text{В}$  (режим блокировки усилителя) приведены на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Измеренные и расчетные частотные характеристики для двух режимов работы усилителя из состава МИС MSP010D.

Полученные измеренные частотные зависимости практически совпали с расчетом. Подавление сигнала в паузе между импульсами является важным параметром, и в данном случае значение в районе минус 19 дБ является небольшим, однако, отметим - тестовый усилитель построен по однокаскадной схеме.

### 3. Заключение

В докладе представлены расчетные и экспериментальные результаты использования схемы стабилизации затворного смещения активных элементов в разработанных МИС. При незначительной занимаемой площади самой схемой стабилизации на кристаллах получается минимизировать разброс коэффициента усиления при серийном запуске, и тем самым повысить схемотехнически выход годных.

Представлена схема стабилизации затворного смещения с возможностью модуляции напряжения затвора активного элемента усилителя.

#### Список литературы

1. De Hek A. P., Busking E. B. On-chip active gate bias circuit for MMIC amplifier applications with 100% threshold voltage variation compensation //2006 European Microwave Conference. – IEEE, 2006. – С. 1751-1754.
2. Пчелин В. А. и др. Выходной импульсный сигнал транзисторного СВЧ усилителя мощности с модуляцией напряжения затвора //Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – С. 574-576.