

Влияние эффектов ловушек GaN HEMT транзисторов на амплитудно-фазовую нестабильность импульсных СВЧ усилителей мощности

Б.В. Емельянов

АО «НПП «Пульсар», г. Москва

Аннотация: в данной работе исследовалось влияние эффектов памяти, в частности эффектов ловушек GaN HEMT транзисторов на амплитудно-фазовую нестабильность импульсных СВЧ усилителей мощности, применяемых в различных радиолокационных системах.

Ключевые слова: СВЧ усилитель мощности, амплитудно-фазовая нестабильность, эффекты ловушек, GaN транзистор

1. Введение

В современных радиолокационных системах, для фильтрации сигналов от неподвижных целей, применяют алгоритмы селекции движущихся целей. Данный алгоритм очень чувствителен к девиации амплитуды и фазы между импульсами излучаемого СВЧ сигнала. Параметр, характеризующий данную девиацию – амплитудно-фазовая нестабильность [1].

При проектировании современных усилителей мощности, в качестве активного элемента усилительных каскадов, всё чаще закладывают GaN HEMT транзисторы. Данные транзисторы, по сравнению с классическими транзисторами на кремнии, обладают высоким КПД, большей выходной мощностью, меньшим тепловым сопротивлением, высокой надёжностью, и повышенной радиационной стойкостью. Но у GaN транзисторов присутствует эффект ловушек [2], снижающий амплитудно-фазовую нестабильность импульсных СВЧ сигналов. Амплитудно-фазовая нестабильность каскада на кремниевом биполярном транзисторе может быть на 15 дБ ниже, чем на GaN транзисторе. В связи с этим, автором было проведено исследование влияния эффектов ловушек на амплитудно-фазовую нестабильность импульсных СВЧ усилителей мощности для РЛС.

2. Стенд и метод измерения амплитудно-фазовой нестабильности.

Существует несколько различных алгоритмов оценки амплитудно-фазовой нестабильности. В данной работе применялся метод оценки нестабильности по отклонению амплитуды и фазы от импульса к импульсу, поскольку он максимально приближен к простым алгоритмам селекции движущихся целей, например к алгоритму череспериодной компенсации. В данном алгоритме происходит векторное вычитание последовательных импульсов, в случае отражения сигналов от неподвижной цели векторы последовательных радиоимпульсов будут совпадать, и поскольку последовательные импульсы вычитаются, на выходе фильтра ЧПК будет отсутствовать сигнал. В случае отражения пачки радиоимпульсов от подвижной цели, векторы последовательных импульсов будут различаться, и на выходе фильтра ЧПК будет синусоидальный сигнал, частота которого будет равна линейной скорости цели.

Амплитудная нестабильность по данному алгоритму определяется по формуле:

$$S_A = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} (A_{j+1} - A_j)^2}{A_{cp}^2} \right] \quad (1)$$

где $A_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_j$, A_j – амплитуда импульса, N – количество накопленных импульсов.

Фазовая нестабильность определяется по данной формуле:

$$S_\varphi = 10 \log \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} (\varphi_{j+1} - \varphi_j)^2 \quad (2)$$

где $\varphi_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varphi_j$, φ_j – фаза импульса, N – количество накопленных импульсов.

Для измерения амплитудно-фазовой нестабильности по данной методике был создан стенд. Первый стенд основан на анализаторе сигналов FSW и высокостабильном СВЧ генераторе SMF. На рисунке 1 показана фотография данного стенда. Импульсные последовательности формируются в генераторе импульсов производства АО «НПП «Пульсар». Управление всего оборудования, сбор и обработка данных осуществляется на ПК при помощи ПО собственной разработки АО «НПП «Пульсар». Данный стенд позволяет измерять амплитудно-фазовую нестабильность до уровня -65 дБ.

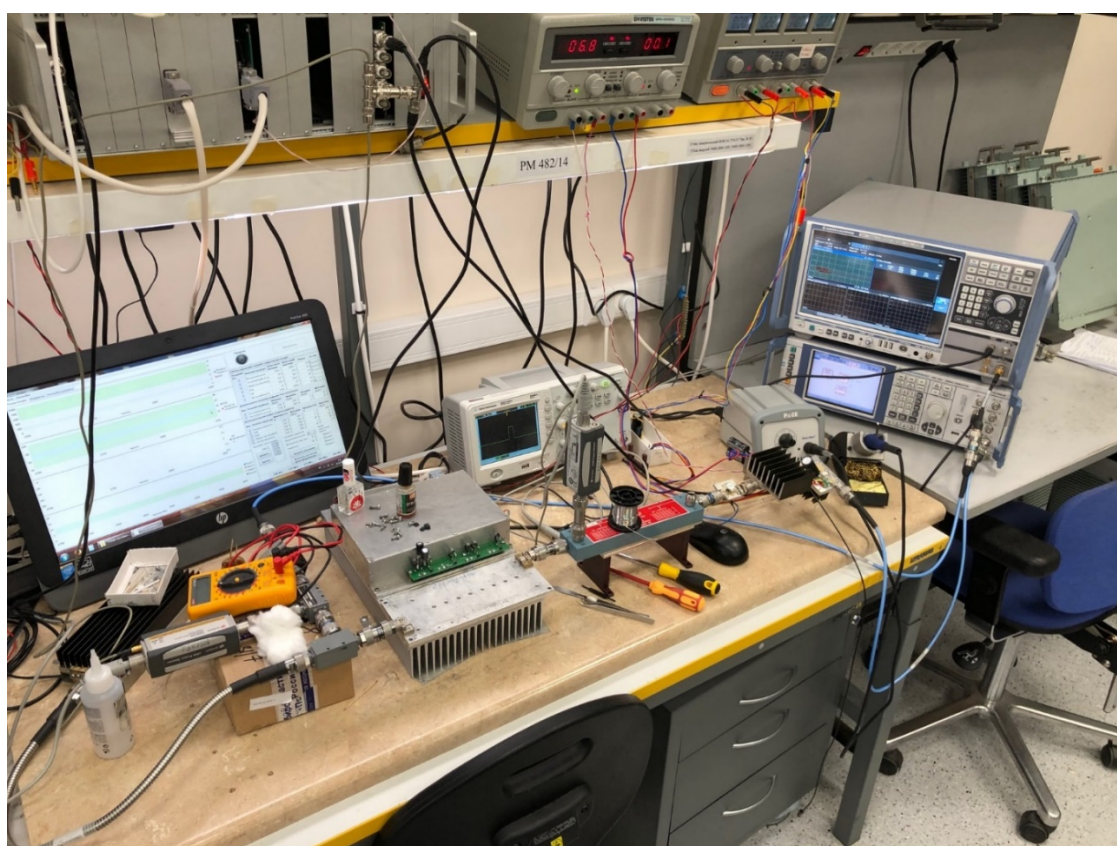


Рисунок 1. Стенд измерения амплитудно-фазовой нестабильности усилителя мощности.

2. Эффект ловушек НЕМТ транзисторов.

Эффект ловушек НЕМТ транзисторов имеет сильно выраженный эффект памяти, соответственно ловушки влияют на амплитудно-фазовую нестабильность

усилительного каскада. Данный эффект зависит от технологии изготовления НЕМТ транзистора [3] и может сильно отличаться у транзисторов, произведённых на разных фабриках.

Для расчёта влияния эффекта ловушек, модель НЕМТ транзистора была дополнена узлом учёта влияния данного эффекта. На рисунке 2 показана схема данного узла.

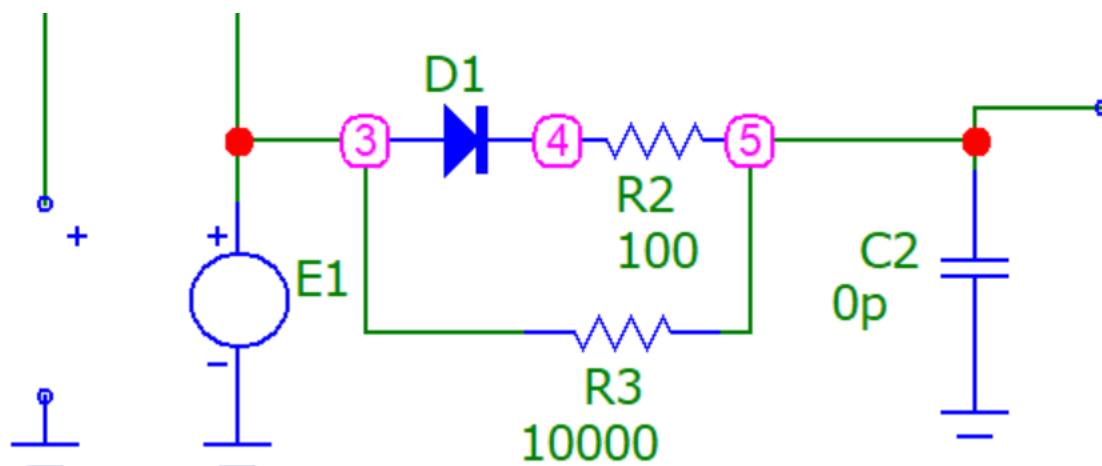


Рисунок 2. Узел учёта влияния эффекта ловушек НЕМТ транзистора.

Скорость насыщения ловушек определяется резистором R2, скорость рассасывания ловушек определяется резистором R3, общее количество ловушек определяется конденсатором C2, уровень воздействия эффекта ловушек на проводимость канала стоит-исток и порогового напряжения затвор-исток определяет коэффициент передачи трансформатора напряжения E1. Для характеристики эффекта ловушек модели GaN СВЧ транзистора подбиралось фиксированное напряжение затвор-исток, которым определялся ток сток-исток, далее импульсной последовательностью изменялось напряжение сток-исток с напряжение 2 В на напряжение 10 В и обратно. По осциллограмме тока сток-исток определялись параметры модели ловушек транзистора с высокой подвижностью электронов. На рисунке 3 показана данная зависимость тока сток-исток при характеристике учёта влияния эффекта ловушек.

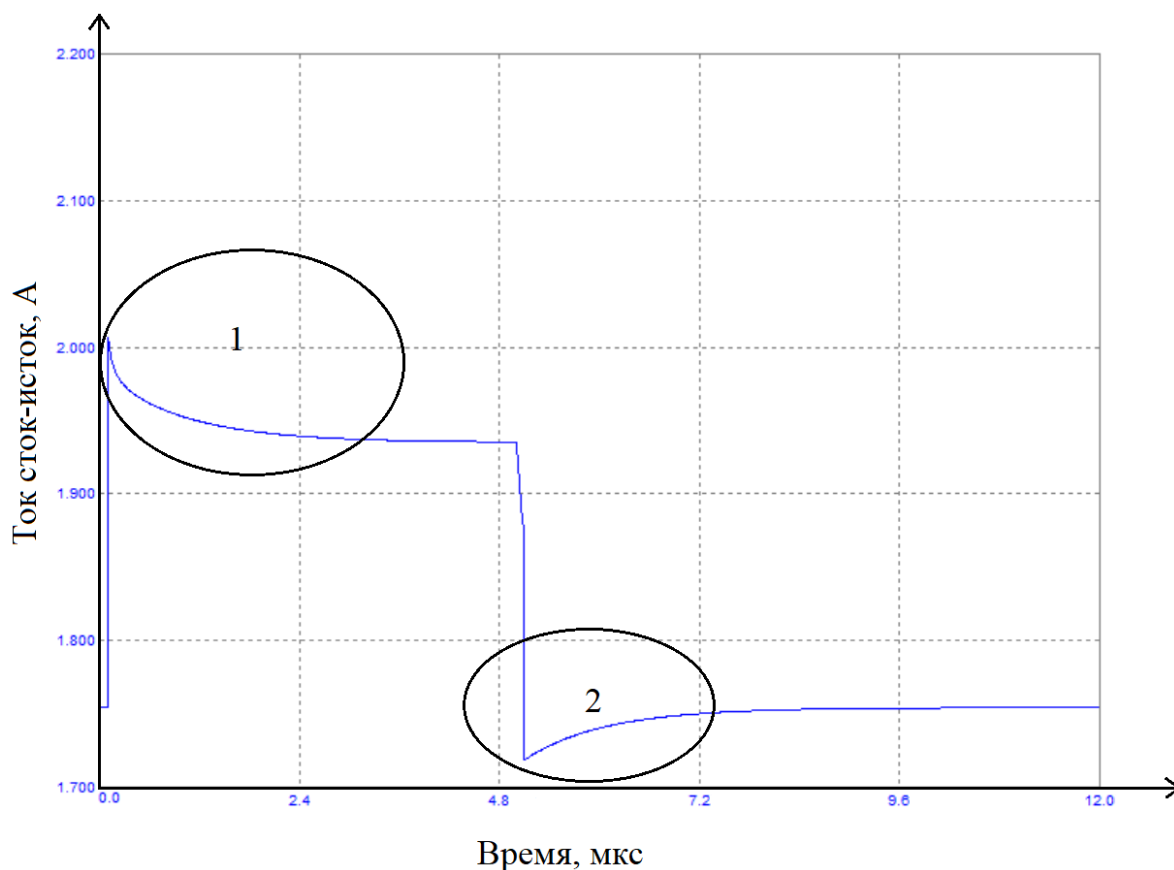


Рисунок 3. Узел учёта влияния эффекта ловушек НЕМТ транзистора.

На данном графике на участке 1 видно, что ток в начальный момент превышает ток в конце импульса. Данный эффект обусловлен накоплением носителей заряда в ловушках. Из-за данного накопления проводимость канала падает. На участке 2 происходит постепенная эмиссия электронов из ловушек, из-за чего ток восстанавливается до начального значения.

3. Результаты измерений амплитудно-фазовой нестабильности.

Далее, используя стенд измерения эффекта ловушек, были измерены значения амплитудно-фазовой нестабильности и определены номиналы элементов узла расчёта эффектов ловушек различных транзисторов, работающих в линейном режиме и режиме насыщения. Для данных исследований применялась транзисторная сборка УМ-2731-250/10 основанная на GaN кристаллах условной «фабрики №1», УМ-2731-200/10 основанная на GaN кристаллах условной «фабрики №2» и УМ-2731-180/10 основанная на GaN кристаллах условной «фабрики №3». Результаты измерения амплитудно-фазовой нестабильности данных образцов показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты амплитудно-фазовой нестабильности транзисторных сборок

Наименование сборки	АФН в линейном режиме	АФН в режиме насыщения
УМ-2731-250/10	-58	-53
УМ-2731-200/10	-53	-47
УМ-2731-180/10	-50	-45

По результатам измерений можно сделать вывод о том, что амплитудно-фазовая нестабильность сильно зависит как от режима работы транзистора, так и от технологии изготовления кристалла транзистора.

3. Заключение

Усилительные СВЧ каскады на нитрид-галлиевых полевых транзисторах обладают большими преимуществами над каскадами на кремниевых транзисторах. Большинство современных мощных СВЧ усилителей основаны на GaN транзисторах. Но, при проектировании усилителей для устройств чувствительных к эффектам памяти, необходимо учитывать влияние эффекта ловушек нитрид-галлиевых транзисторов. Также следует тщательно подходить к выбору транзистора и, при необходимости, проводить измерения на нестабильность, поскольку данный параметр является специфическим и не отображается производителями транзисторов и транзисторных кристаллов в справочной информации.

Список литературы

1. Емельянов Б. В. Исследование амплитудно-фазовой стабильности биполярных импульсных СВЧ транзисторов, работающих в оконечных усилительных каскадах РЛС //Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2019. – №. 3. – С. 19-28.
2. Binari S. C. et al. Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – Т. 48. – №. 3. – С. 465-471.
3. Груздов В. В., Колковский Ю. В., Концевой Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике //М.: Техносфера. – 2016. – Т. 328.