

## Метод снижения вероятности электрического пробоя GaN СВЧ транзисторов при работе в режиме максимальной выходной мощности

Глыбин А. А., Синкевич В. Ф., Курмачёв В. А.

Показано, что для снижения вероятности электрического пробоя GaN СВЧ транзисторов необходимо, чтобы модулятор, формирующий напряжение на стоке СВЧ транзистора, выключался раньше окончания СВЧ импульса. Это позволяет обеспечить безотказную работу транзисторов ЗПС987В при повышенном напряжении стока 40 В в режиме максимальной выходной мощности.

### Введение

Одно из основных преимуществ СВЧ транзисторов на гетероструктурах GaN – более высокое по сравнению с СВЧ транзисторами на арсениде галлия рабочее напряжение между истоком и стоком (рис. 1) [1-6].

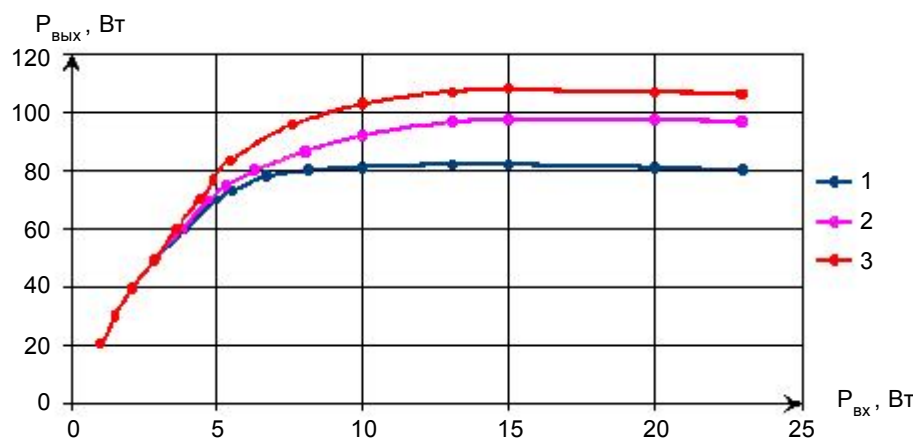


Рис. 1

Зависимости выходной импульсной мощности  $P_{вых}$  GaN транзисторов от входной мощности  $P_{вх}$  при различных напряжениях питания  $U_{пит}$ :  
1 – 24 В; 2 – 30 В; 3 – 40 В ( $\tau_{имп} = 20$  мкс;  $Q = 10$ )

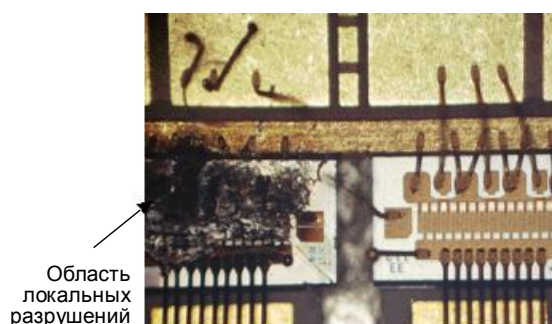


Рис. 2

Разрушение структуры СВЧ транзистора в результате пробоя

Высокое напряжение на стоке позволяет повысить выходную СВЧ мощность транзисторов на GaN до максимального уровня ~ 9,5 Вт на мм длины затвора. Повышение рабочего напряжения  $U_{пит}$  [7] ограничено возникновением инжекционного или теплового пробоя транзисторов на GaN. Пробой сопровождается шнурованием тока и необратимыми разрушениями (оплавлением металлизации) в локальной области структуры СВЧ транзистора на GaN (рис. 2). В связи с этим возникла необходимость поиска метода, позволяющего уменьшить вероятность

возникновения пробоя GaN СВЧ транзисторов при работе в режиме максимальной выходной мощности при повышенном рабочем напряжении  $U_{пит}$ .

## Основные экспериментальные результаты

Установлено, что для обеспечения надёжной работы твердотельного усилителя мощности на GaN СВЧ транзисторах 3ПШ987В важнейшее значение имеет расстановка импульсов управления во временной диаграмме управляющих напряжений относительно импульсного СВЧ сигнала. Напряжение питания стока СВЧ транзистора  $U_c$ , сформированное модулятором, существенно изменяется при прохождении импульсного СВЧ сигнала (напряжение протектированного сигнала  $U_d$ ). Как показали измерения, имеют место выбросы напряжения  $U_c$ , возникающие при прохождении импульсного СВЧ сигнала. Это свидетельствует об индуктивном характере импеданса цепи питания СВЧ транзистора на низких частотах и обусловлено тем, что из-за размещения радиатора непосредственно под СВЧ транзистором длина проводов, связывающих сток СВЧ транзистора с модулятором, составляет  $\sim 100-150$  мм, что обеспечивает заметную индуктивность в указанной цепи. Особую опасность представляют выбросы на заднем фронте СВЧ сигнала, величина которых составляет около 40 В, а длительность порядка долей мкс (рис. 3).

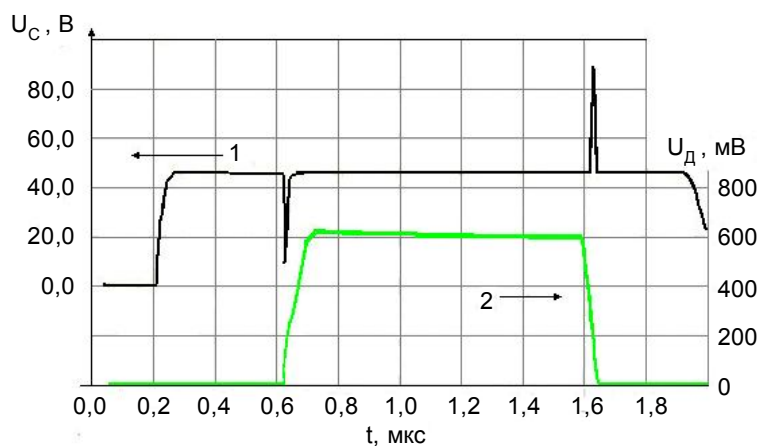


Рис. 3

Эпюры напряжения на стоке СВЧ транзистора при прохождении импульсного СВЧ сигнала:

1 – напряжение на стоке СВЧ транзистора  $U_c$ ; 2 – напряжение протектированного импульсного СВЧ сигнала  $U_d$

В этих условиях если амплитуда выброса напряжения на стоке транзистора превысит значение напряжения инжекционного изотермического пробоя  $U_{пр}$  [7], то за время  $\sim 0,5-1$  нс транзистор перейдет в состояние с узким ( $\sim 1$  мкм в диаметре) шнуром тока. Если длительность перенапряжения достаточна для сильного локального разогрева в области шнура инжекционного тока, протекающего через буферный слой от стока к истоку, то возникают локальные разрушения структуры транзистора (оплавление

металлизации и т. д.) и соответственно деградация его характеристик. Причина этих разрушений связана с большими градиентами температуры и соответственно механическими напряжениями, которые возникают в области локализации узкого шнура тока. Локальные необратимые изменения могут накапливаться на протяжении длительного времени за счёт развития усталостных процессов. В определённых условиях наступает полный катастрофический отказ транзистора, когда энергии, выделяемой в области шнура тока, достаточно для проплавления полупроводника (GaN) материалом металлизации (рис. 2).

Напряжение инжекционного изотермического пробоя  $U_{пр}$  практически совпадает с напряжением начала ударной ионизации носителей в области сильных полей у стока и с ростом тока стока  $I_c$  резко уменьшается [7]. Для исследуемых транзисторов напряжение лавинного пробоя в режиме полной отсечки составляет не менее 80 В. Следовательно, для обеспечения безопасной работы при  $U_{пит} = 40$  В необходимо уменьшить амплитуду выброса напряжения на заднем фронте СВЧ импульса для устранения возможности

развития инжекционного пробоя. Экспериментально установлено, что для уменьшения выброса на заднем фронте СВЧ импульса необходимо, чтобы модулятор, формирующий напряжение на стоке СВЧ транзистора, выключался раньше окончания СВЧ импульса (рис. 4).

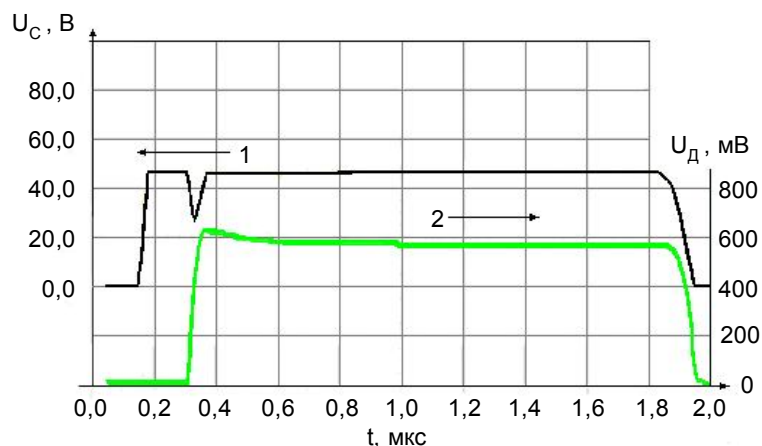


Рис. 4

Эпюры напряжения на стоке СВЧ транзистора при прохождении импульсного СВЧ сигнала и выключении модулятора, формирующего напряжение на стоке СВЧ транзистора, раньше окончания импульсного СВЧ сигнала:

1 – напряжение на стоке СВЧ транзистора  $U_C$ ; 2 – напряжение протектированного импульсного СВЧ сигнала  $U_D$

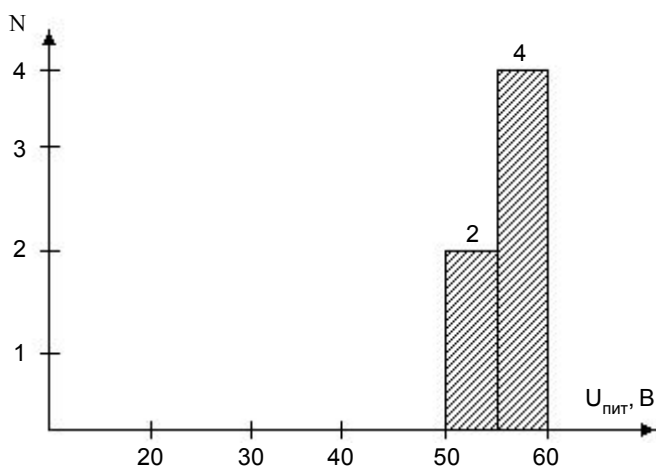


Рис. 5

Результаты граничных испытаний транзисторов 3ПШ987В ( $N$  – число отказавших транзисторов)

напряжения на стоке GaN СВЧ транзистора, возникающими при выключении СВЧ сигнала в режиме максимальной импульсной СВЧ мощности, модулятор питания стока GaN СВЧ транзистора должен выключаться не менее чем за 150 нс до начала заднего фронта СВЧ импульса. Это обеспечивает снижение амплитуды выброса напряжения на стоке GaN СВЧ транзистора до уровня  $\leq 10\%$  напряжения питания стока.

В результате при напряжении питания 40 В резко уменьшается вероятность возникновения пробоя транзисторов за счёт выброса напряжения на стоке, что позволяет обеспечить режим с максимальной выходной СВЧ мощностью.

Для оценки эффективности предложенного метода снижения вероятности пробоя были проведены граничные испытания в СВЧ режиме по напряжению питания  $U_{пит}$  на выборке GaN транзисторов 3ПШ987В объёмом 10 шт. Напряжение повышалось ступенями. Длительность каждой ступени составляла 24 ч, а амплитуда  $\Delta U_{пит} = 5$  В (рис. 5).

Как следует из полученных результатов, безопасный уровень напряжения питания, при котором отказы GaN СВЧ транзисторов отсутствовали, составляет 40 В. При этом запас по напряжению питания составляет порядка 10 В (коэффициент запаса равен  $K_3 = 50 \text{ В} / 40 \text{ В} = 1,25$ ). Полученные результаты показывают возможность обеспечения устойчивой работы GaN НЕМТ 3ПШ987В при повышенных напряжениях питания до  $U_{пит} = 40$  В.

### Выводы

Установлено, что для снижения вероятности электрического (инжекционного) пробоя GaN СВЧ транзистора, обусловленного короткими импульсными выбросами

---

## *Литература*

1. Nicolas Defrance, Virginie Hoel, Yannick Douvry, Jean Claude De Jaeger, Christophe Gaquiere, Xiao Tang, Michel Rousseau, Marie Antoinette di Forte-Poisson, James Thorpe, Nasime Lahreche, and Robert Langer. AlGaIn/GaN HEMT High Power Densities on SiC/SiO<sub>2</sub>/poly-SiC Substrates // IEEE electron device letters – Vol. 30. – № 6. – JUNE 2009. – P. 596.
2. Jean-Claude Gerbedoen, Ali Soltani, Sylvain Joblot, Jean-Claude De Jaeger, Christophe Gaquiere, Yvon Cordier, and Fabrice Semond. AlGaIn/GaN HEMTs on (001) Silicon Substrate With Power Density Performance of 2.9 W/mm at 10 GHz // IEEE transactions on electron devices. – Vol. 57. – № 7. – JULY 2010. – P.1497.
3. Jawad H. Qureshi, Marco J. Pelk, Mauro Marchetti, W. C. Edmund Neo, John R. Gajadharsing, Mark P. van der Heijden, and L. C. N. de Vreede. A 90-W Peak Power GaN Outphasing Amplifier With Optimum Input Signal Conditioning // IEEE transactions on microwave theory and techniques. – Vol. 57. – №. 8. – AUGUST 2009. – P. 1925.
4. А. Кищинский. Широкополосные транзисторные усилители мощности СВЧ диапазона – смена поколений // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2010. – № 2.
5. А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой. СВЧ приборы и устройства на широкозонных полупроводниках // М.: Техносфера. – 2011. – 416 с.
6. Р. Куэй. Электроника на основе нитрида галлия // Пер. с англ. под ред. А. Г. Васильева / М.: Техносфера. – 2011. – 592 с.
7. V. A. Vashenko, V. F. Sinkevitch // Physical Limitations of Semiconductor Devices. – 2008 Springer Science+Busines Media, LLC. – 330 p.