

УДК 621.292.3

DOI: 10.36845/2073-8250-2020-259-4-12-18

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛЛАПСА ТОКА В GAN ТРАНЗИСТОРАХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

И.М. Аболдуев, Н.В. Алкеев, В.С. Беляев, Е.В. Каевитсер, И.Д. Кашлаков
АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, 27

В статье рассматриваются аппаратные и методические вопросы, связанные с вольтамперными характеристиками (ВАХ) GaN HEMT. Значение достоверных ВАХ характеризует работоспособность полупроводникового прибора, предоставляет исходные данные для его функционального применения, информирует о качестве и воспроизводимости технологического процесса. Вид и поведение ВАХ GaN HEMT осложняется его конструктивными и технологическими особенностями. Измерение ВАХ в непрерывном и импульсном режимах позволяет получить более полную информацию об электрических и тепловых характеристиках исследуемых приборов.

Ключевые слова: GaN HEMT, ВАХ, коллапс, импульсный режим, ловушки электронов

Сведения об авторах: Аболдуев Игорь Михайлович, к.т.н., abolduev@mail.ru; Алкеев Николай Владимирович, с.н.с., alkeev@pulsarnpp.ru; Беляев Виктор Сергеевич, старший научный сотрудник, belyaev@pulsarnpp.ru; Каевитсер Екатерина Владиленовна, к.ф.-м.н., kaevitser_ev@pulsarnpp.ru; Кашлаков Игорь Дмитриевич kashlakov_id@pulsarnpp.ru

CURRENT COLLAPSE MEASUREMENTS IN PULSED GAN TRANSISTORS

L. A. Seydman, Yu. A. Kontsevov, K. L. Enisherlova, S. V. Minnebaev
S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

The article discusses the issues of design and methodology related to the current-voltage (I-V) characteristics of a GaN HEMT. Reliable I-V characteristics show the operability of a semiconductor device, provide initial data for functional application of the device, and provide insight into the quality and reproducibility of the technological process. The type and behavior of I-V characteristics are influenced by the design and technological features of a GaN HEMT. Measurements of I-V characteristics in continuous and pulsed operation modes provide more details about the electrical and thermal characteristics of the devices under study.

Keywords: GaN HEMT, I-V characteristics, collapse, pulsed mode, electron traps

Data on Authors: Abolduev Igor Mikhaylovich, Ph.D., abolduev@mail.ru; Alkeev Nikolay Vladimirovich, senior researcher, alkeev@pulsarnpp.ru; Belyaev Viktor Sergeevich, senior researcher, belyaev@pulsarnpp.ru; Kaevitser Eketerina Vladilenovna, Ph.D., kaevitser_ev@pulsarnpp.ru; Kashlakov Igor Dmitrievich kashlakov_id@pulsarnpp.ru

Введение

Особенностью транзисторов $A_{III}B_V$ и, в частности GaN транзисторов является то, что в них важную роль играют ловушки (traps) электронов. Они ухудшают частотные характеристики транзисторов (gate-lag, drain-lag), изменяют ВАХ транзисторов, ухудшая выходную мощность. Это явление называется также коллапсом тока [1]. В процессе работы транзистора происходит генерация новых ловушек, что приводит к деградации транзисторов (уменьшается срок их службы). Измерение коллапса тока представляет важную задачу и проводилось многими исследователями [1-4]. Отметим, что времена жизни электронов на ловушках занимает очень широкий временной интервал от долей микросекунды и до бесконечности. Ловушки в GaN транзисторах отличаются также своим местоположением. Наибольшее влияние на работу GaN транзисторов оказывают ловушки, расположенные под затвором, а также в области между затвором и стоком. Заполнение ловушек первого типа смещает напряжение открытия транзистора (пороговое напряжение или V_{th}), приведены формулы, по которым можно оценить плотность ловушек под затвором [2]. Заполнение ловушек второго типа приводит к увеличению сопротивления между истоком и стоком (сопротивление R_{on} при $V_g = 0$), здесь также приведены формулы [2], которые позволяют оценить плотность ловушек в области между затвором и стоком.

Постановка задачи

Для исследования коллапса тока в GaN транзисторах используют разные подходы и часто для исследования коллапса тока в GaN транзисторах проводят из-

мерение вольтамперных характеристик (ВАХ) в импульсном режиме [1-3], которые существенно изменяют форму ВАХ транзистора и дают возможность характеризовать величину коллапса. Еще одной причиной использования импульсного режима является отсутствие перегрева транзисторов.

Установка

Была разработана установка для измерения ВАХ в импульсном режиме. Программное обеспечение измерительного комплекса написано в среде разработки Delphi. Для ускорения разработки в качестве программного интерфейса к измерительным приборам (осциллографу и генераторам), подключенным к персональному компьютеру (ПК), было принято решение использовать набор библиотек Keysight (Agilent) IO Libraries Suite фирмы Keysight Technologies, в частности интерфейс прикладного программирования (API) VISA. При разработке использовалась версия 18.1.24130.0 библиотек.

Программа позволяет задать параметры цикла измерений и вывода результатов. Главное окно программы содержит несколько вкладок. На рис. 1 в качестве примера приведено изображение первой вкладки, где сосредоточено всё управление циклом измерений. Здесь задаются параметры импульсов, подаваемых на затвор и сток транзистора, такие как, максимальное и минимальное напряжение вершины импульсов, шаг изменения этого напряжения, значение напряжения полки (основания) импульсов, их длительность и длительность фронтов подаваемых импульсов. Задаётся коэффициент преобразования (с учётом номинала измерительного сопротивления и коэффициента усиления

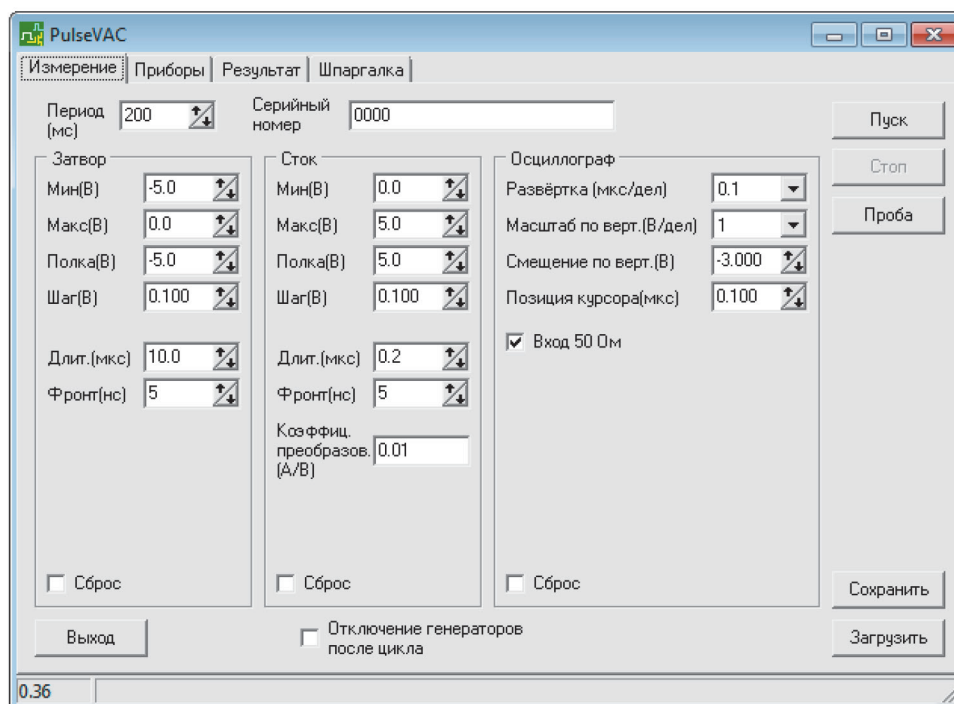


Рис. 1
Пример вкладки 1

инструментального усилителя) измеряемого осциллографом напряжения в ток стока. Также на этой вкладке задаются параметры осциллографа и период подачи измерительных импульсов.

На второй вкладке задаются VISA-адреса измерительных приборов. Предусмотрена проверка правильности заданных адресов и доступность подключенных измерительных приборов к ПК. Программа позволяет сохранить конфигурацию измерительного стенда и при новом запуске автоматически считывает её из сохранённого файла.

На третьей вкладке определяется имя выходного файла результатов измерения, каталог его размещения и формат данных, сохраняемых в нём. В частности, предусмотрено добавление серийного номера прибора, автоматическое добавление даты и времени проведения измерения в имя файла. Это позволяет проводить несколько измерений, не возвращаясь к этой

вкладке, и упрощает сортировку и отбор файлов измерений. На четвёртой вкладке размещена краткая инструкция работы с программой.

На рис. 2 показана принципиальная схема для измерений импульсных ВАХ GaN транзисторов. Сигнал с Gen1 через быстродействующий усилитель AD4870 с коэффициентом усиления 6 подавался на сток транзистора. Сигнал на затвор подавался с Gen2. Интервал следования импульсов затвора и стока составлял 200 мс. Импульсное напряжение затвора длительностью 800 нс изменялось от -4 В до нуля с шагом 1 В. Длительность импульса стока была тоже 800 нс и он был сдвинут относительно импульса затвора вперед на 100 нс. Шаг по стоку был 0.1 В. Для измерения тока через транзистор Т1 была разработана схема преобразователя «ток-напряжение», состоящая из быстродействующего операционного усилителя и транзистора

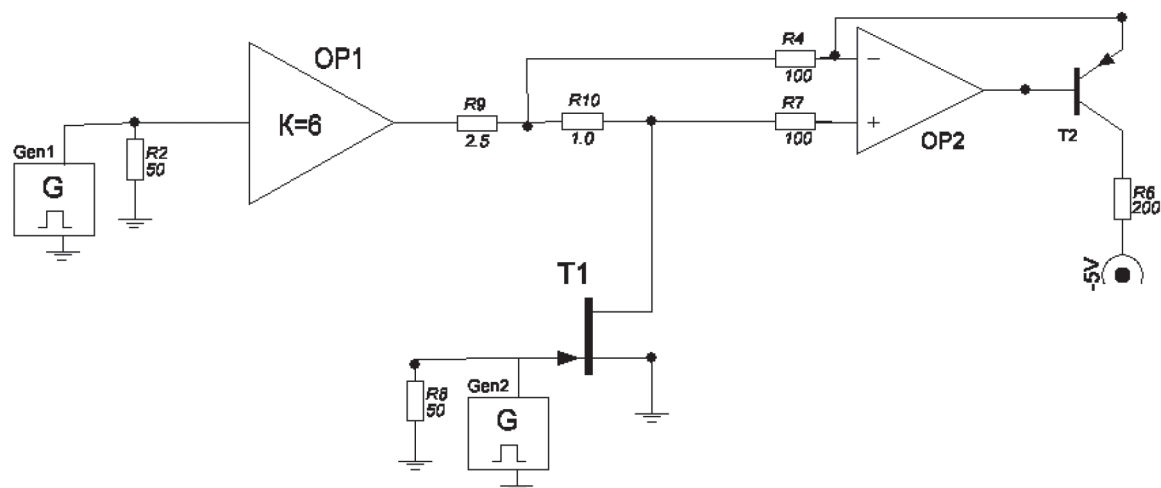


Рис. 2

Схема установки для измерения импульсных ВАХ GaN транзисторов

T2. Сигнал пропорциональный току снимался с резистора R10. Выходной сигнал, пропорциональный току стока снимался с коллектора T2. Величина коэффициента преобразования составляла 2 В/А. Измерения проводилось с задержкой 500 нс от начала импульса затвора. Отметим, что при больших токах часть напряжения падает на сопротивлениях R9 и R10, поэтому при больших токах ВАХ идут не до 12 В, а до 6 В.

Для исследования коллапса тока помимо импульсного напряжения на сток дополнительно подавалось напряжение смещения – «полки», которое изменялось от нуля до 24 В с шагом 6 В.

Результаты измерений

На рис. 3 представлены осциллограммы тока и напряжений. Верхняя осциллограмма показывает импульс тока I_d через транзистор. Средняя осциллограмма – показы-

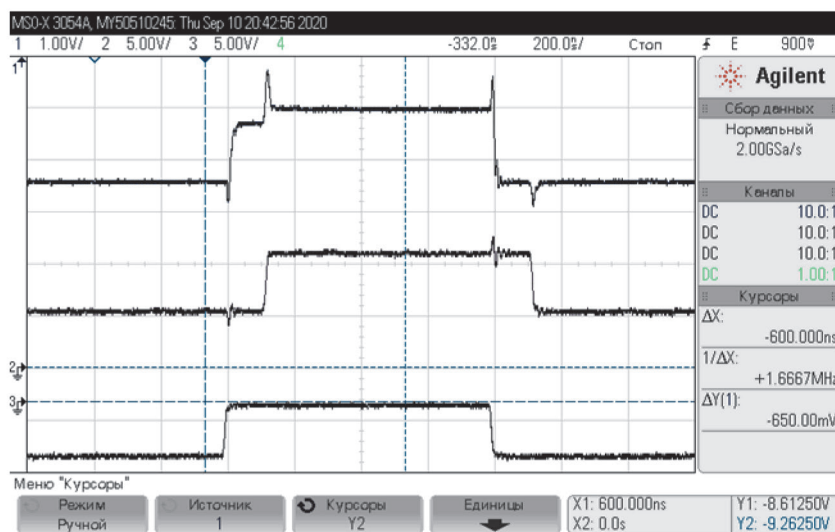


Рис. 3

Осциллограммы импульсов тока и напряжений

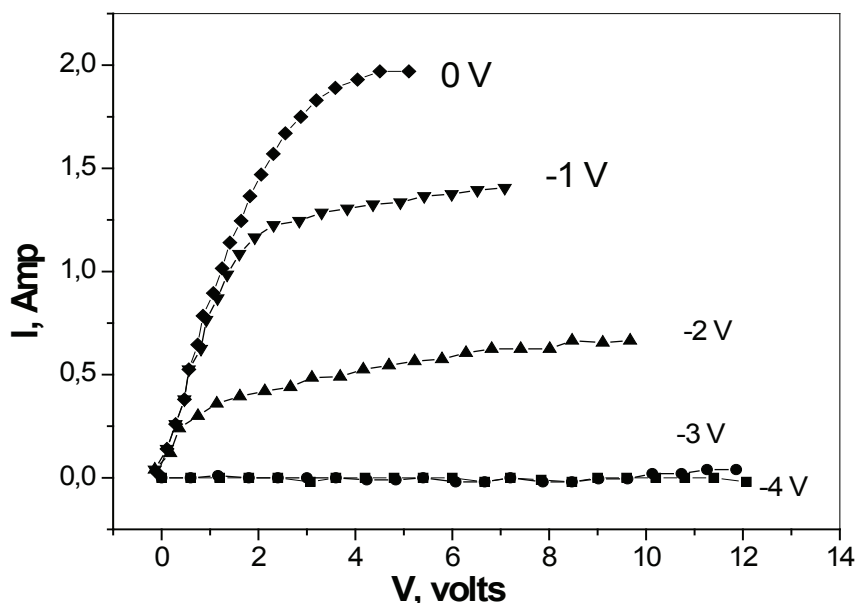


Рис.4

Семейство ВАХ транзистора с шириной затвора 2 мм

вает напряжение на выходе операционного усилителя ОП1 и нижняя – напряжение на затворе. Измерения проводились с шагом +1 В напряжения по затвору от -4 до 0 В. По стоку шаг напряжения составлял 0.1 В. Нулевые линии каждого луча отмечены стрелкой слева. Момент измерения тока и

напряжений отмечен штриховой линией справа.

На рис. 4 показано семейство ВАХ 2 мм транзистора, построенных по результатам импульсных измерений.

Обычно величину коллапса характеризуют числом [4, 6], и мы будем использо-

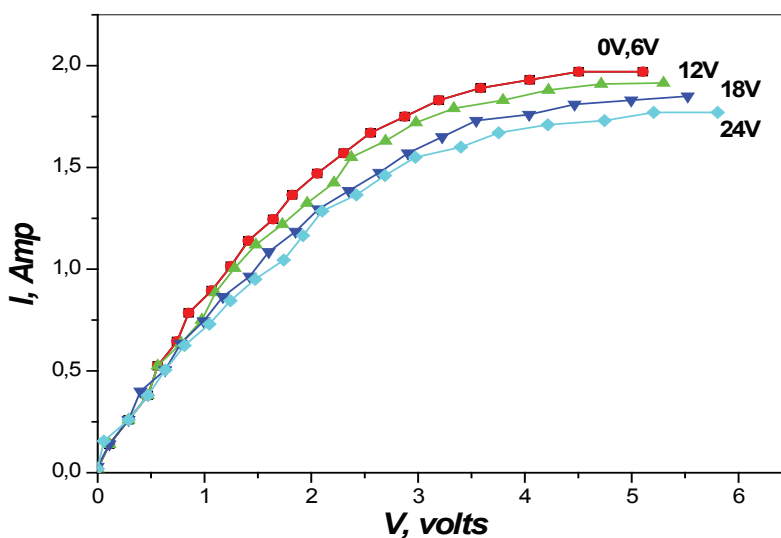


Рис. 5

Зависимость тока I_d через транзистор от напряжения полки

вать формулу из [6].

$$CC = 100 \times (I_{de} - I_{df}) / I_{df}. \quad (1)$$

Здесь I_{de} – ток через ловушки, когда на них нет захваченных электронов (empty). Для этого в течение часа транзистор прогревают при 300°C. Для заполнения ловушек транзистора через последний пропускают ток I_{ds} , изменяя напряжение на затворе по определенной программе, при этом ток падает до I_{df} (от слова fill). В нашем случае мы оценивали коллапс по сдвигу плоской части I-V кривых вниз (когда они выходят на насыщение), используя ту же формулу (1) (рис. 5).

Отметим, что время жизни электрона на ловушке экспоненциально зависит от ее энергии активации и для глубоких ловушек с энергией активации более 1.5 эВ время жизни при 300°C будет порядка многих часов.

На рис. 6 приведена зависимость коллапса тока в процентах от напряжения полки, видно, что с ростом этого напряжения коллапс тока увеличивается.

Литература

1. G. Meneghesso, G. Verzellesi, R. Pierobon, F. Rampazzo, A. Chini, Umesh K. Mishra, C. Canali, and E. Zanoni. Surface-related drain current dispersion effects in AlGaIn-GaN HEMTs. IEEE Transaction on Electron Devicez, 2004, vol. 51, no.10, pp.1554-1561.
2. B. M. Paine, S. R. Polmanter, V. T. Ng, N. T. Kubota, C. R. Ignacio. Fast-pulsed characterization of RF GaN HEMTs in life test systems. IEEE Transaction on Device and Materials Reliability, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 130-137.
3. D. Bisi, A. Stocco, M. Meneghini, F. Rampazzo, A. Cester, G. Meneghesso, E. Zanoni. High-voltage double-pulsed measurements system for GaN-based power HEMTs. IEEE International Reliability Physics Symposium, 2014, 1-5 June, Waikoloa. pp. CD.11.1-CD.11.4
4. Xiao-Hua Ma, Jie-Jie Zhu, Xue-Yang Liao, Tong Yue, Wei-Wei Chen, and Yue Hao. Quantitative characterization of interface traps in Al₂O₃/AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistors by dynamic capacitance dispersion technique. Applied Physics Letters, 2013, vol. 103, iss.3, p.033510.
5. J. Joh, J. D. del Alamo, J. Jimenez. A simple current collapse measurement technique for GaN High-electron mobility transistors. IEEE Electron Device Letters, 2008, vol. 29, no. 7, pp. 665-667.
6. B. M. Paine, S. R. Polmanter, V.T. Ng, N.T. Kubota. Fast-pulsed characterizations of GaN HEMTs during wearout. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2017, vol.17, no.1, pp.184-190.

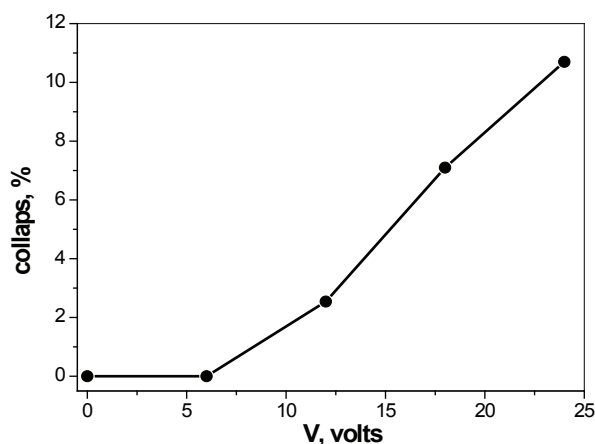


Рис. 6

Зависимость коллапса тока от напряжения «полки»

Выводы

С помощью разработанной установки проведено исследование транзисторов на основе GaN. Подтвержден эффект коллапса, т.е. зависимость вольтамперных характеристик от различных режимов работы транзистора.

References

1. Meneghesso G., Verzellesi G., Pierobon R., Rampazzo F., Chini A., Mishra Umesh K., Canali C., and Zanoni E. Surface-related drain current dispersion effects in AlGaIn–GaIn HEMTs. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 2004, vol. 51, no. 10, pp. 1554-1561.
2. Paine B. M., Polmanter S. R., Ng V. T., Kubota N. T., Ignacio C. R. Fast-pulsed characterization of RF GaIn HEMTs in life test systems. *IEEE Transaction on Device and Materials Reliability*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 130-137.
3. Bisi D., Stocco A., Meneghini M., Rampazzo F., Cester A., Meneghesso G., Zanoni E. High-voltage double-pulsed measurements system for GaIn-based power HEMTs. *IEEE International Reliability Physics Symposium*, 2014, 1-5 June, Waikoloa. pp. CD.11.1-CD.11.4
4. Ma X. H., Zhu J. J., Liao X. Y., Yue T., Chen W. W., Hao Y. Quantitative characterization of interface traps in Al₂O₃/AlGaIn/GaIn metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistors by dynamic capacitance dispersion technique. *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, iss. 3, p. 033510.
5. Joh J., del Alamo J. D., Jimenez J. A simple current collapse measurement technique for GaIn High-electron mobility transistors. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, vol. 29, no. 7, pp. 665-667.
6. Paine B. M., Polmanter S. R., Ng V. T., Kubota N. T. Fast-pulsed characterizations of GaIn HEMTs during wearout. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 184-190.