

06

Генерация хаотических колебаний в автогенераторе на лавинно-пролетном диоде

© Е.А. Мясин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
(Фрязинский филиал), Фрязино, Московская обл.
E-mail: eam.168@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 22 сентября 2011 г.

Впервые получены временные реализации хаотических колебаний в автогенераторе на лавинно-пролетном диоде 8 мм диапазона длин волн, используемом в качестве источника сигнала в макете шумовой РЛС.

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) был открыт советскими учеными в 1966 году [1]. Динамическое отрицательное сопротивление в резонансной системе, где ЛПД играл роль активного элемента, возникло тогда, когда на обратно смещенный $p-n$ -переход подавалось напряжение выше напряжения пробоя и в резонансной системе начинал течь ток, превышающий ее омические потери [2]. Параметры резонансной системы и ЛПД определяли частоту электромагнитных колебаний. В первых экспериментах по исследованию генераторов на ЛПД (ГЛПД) стремились получить генерацию гармонического сигнала. Поэтому обычно исследовались мощность и спектр генерируемого одночастотного сигнала, а также стабильность частоты во времени и уровень шумов вблизи нее. При этом использовались приборы, позволяющие исследовать параметры сигнала за достаточно большие промежутки времени (измерители мощности, анализаторы спектра) по сравнению с временем протекания физических процессов в самом ЛПД, обеспечивающих возникновение отрицательного сопротивления.

Была обнаружена и использована возможность генерации шумовых (стохастических) колебаний низкой интенсивности ($10^3 - 10^4$ кТ) в генераторах шума на ЛПД (ГШЛПД) во всем дециметровом и сантиметровом диапазоне волн (напряжение 7–15 В, ток 0.2–10 мА) [2].

Позднее, после того как была открыта возможность генерации хаотических колебаний в электронно-волновых системах с задержанной обратной связью [3], возможность хаотического поведения обнаружили также в других нелинейных динамических системах, в том числе и ГЛПД [4]. Для экспериментального исследования генерируемого хаотического сигнала и перехода ГЛПД в этот режим генерации шума использовались все те же аналоговые приборы с большим временем интегрирования, даже в СВЧ-диапазоне волн [4]. Тем более этого же типа приборы приходилось использовать в миллиметровом диапазоне волн [5]. Однако по мере развития технологий регистрации быстрых процессов появилась возможность наблюдать их в самом ГЛПД при генерации хаотического сигнала в реальном времени. Для этого, как известно, необходимо регистрировать временные реализации сигнала.

Для СВЧ-диапазона эта задача в настоящее время может быть решена (по крайней мере, до 20 GHz) с помощью скоростного осциллографа. Для миллиметрового диапазона таких осциллографов не существует. Однако эту задачу можно решить путем переноса сигнала из миллиметрового диапазона в СВЧ-диапазон. Следует только принять меры для предотвращения искажения сигнала при этой операции. Именно такой способ и был использован для получения временных реализаций сигнала генератора на ЛПД 8-миллиметрового диапазона волн для различных режимов его работы при генерации широкополосного шумового сигнала с шириной спектра ~ 200 MHz и интегральной выходной мощностью ~ 4 mW.

В отличие от коаксиальной конструкции генератора шума сантиметрового диапазона волн в миллиметровом диапазоне за основу конструкции этого ГЛПД была взята волноводная конструкция однодиодного генератора гармонических колебаний с внутриволноводным открытым резонатором [6]. Однако она была изменена таким образом, чтобы в электродинамической системе ГЛПД могли возбуждаться хотя бы две собственные частоты.

Этот ГШЛПД использовался в качестве источника шумового сигнала в макете шумовой РЛС (ШРЛС) с двойной спектральной обработкой [7]. Принцип шумовой локации (ШЛ) с двойной спектральной обработкой заключается в следующем. Излученный в направлении объекта шумовой сигнал с шириной спектра F отражается от объекта, принимается приемной антенной ШРЛС, суммируется с опорным

сигналом, ответвляемым из волноводного тракта излучаемого сигнала, и затем регистрируется спектр суммарного сигнала, содержащий информацию о расстоянии до объекта, если это расстояние L больше, чем длина l корреляции шумового сигнала. Она определяется соотношением $l = c/F$, где c — скорость света. В этом случае огибающая непрерывного спектра суммарного шумового сигнала имеет период $f = c/2L$. Выделение этой частоты $f = c/2L$ реализуется путем повторного спектрального анализа. Это может быть сделано либо с помощью аналогового прибора (второго анализатора спектра), либо с помощью цифровых технологий [8]. Однако можно попытаться заменить первичный анализ сигнала, осуществляемый с помощью анализатора спектра, наблюдением суммарного сигнала во времени и определением информационной частоты $f = c/2L$ в результате применения цифровых технологий. Для выполнения такой обработки широкополосного шумового сигнала необходимо иметь быстрый цифровой осциллограф, с помощью которого можно производить оцифровку временных реализаций. Следует только учесть, что временная реализация должна быть достаточно длинной.

Прежде чем приступить к измерениям с использованием быстрого осциллографа, было необходимо соответствующим образом настроить канал переноса спектра сигнала вниз к нулевой частоте так, чтобы он не искажал информацию. Для этого частота гетеродина была выбрана равной частоте низкочастотной границы спектра генерируемого шумового сигнала, что автоматически приводило к нулевой частоте после преобразования высокочастотного сигнала [9]. В качестве гетеродина использовался генератор качающейся частоты (ГКЧ) панорамного измерителя КСВН Р2-65, перестраиваемый по частоте во всем 8-миллиметровом диапазоне, что существенно облегчало требуемую настройку. Смеситель 8-миллиметрового диапазона с усилителем промежуточной частоты представлял собой интегральный волноводно-коаксиальный модуль, который имел отдельный низковольтный источник питания усилителя.

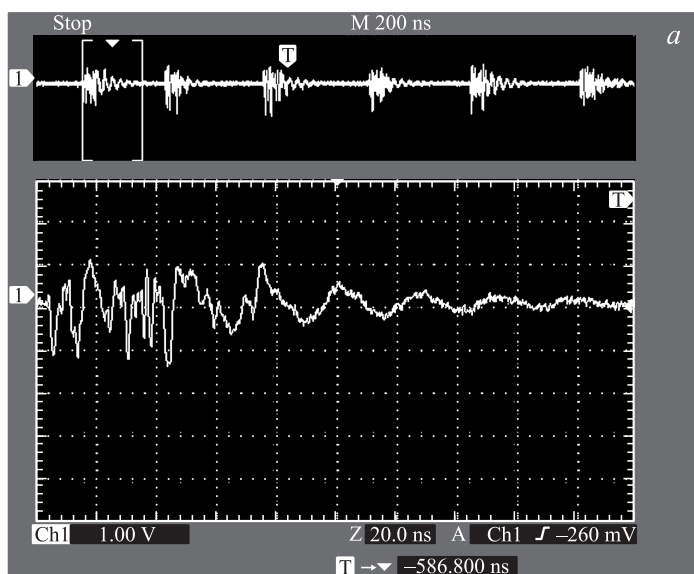
Кроме того, было решено провести сравнение результатов обработки суммарного сигнала шумового локатора на основе этого ГШЛПД 8-миллиметрового диапазона как с переносом спектра вниз, так и без него, используя уже апробированную ранее [8] цифровую обработку первичного спектра. Только после этого можно было использовать суммарный сигнал с выхода усилителя промежуточной частоты для

регистрации реализаций на цифровом осциллографе TDS-3052 фирмы Tectonics, не опасаясь работы усилителя в нелинейном режиме.

Для наблюдения первичного спектра суммарного сигнала до его переноса вниз использовался анализатор спектра С4-60, а после переноса — С4-59. Для того чтобы убедиться в том, что канал переноса спектра вниз работает нормально, прежде всего необходимо было сравнить характер спектра, наблюдаемый на экранах анализаторов спектра. При этом частотный масштаб на обоих анализаторах был установлен один и тот же — 20 МГц/div, при этом спектр суммарного сигнала занимал весь экран осциллографа анализаторов. Были установлены одни и те же полосы пропускания фильтров промежуточной частоты и одинаковые развертки на экранах их осциллографов. В результате многочисленных экспериментов канал переноса спектра вниз был настроен так, что измерения расстояния (4.5 м) до объекта в обоих каналах практически не различались, чему соответствовала периодическая неравномерность спектра в 33 МГц, наблюдаемая на экранах анализаторов спектра.

Как показали наблюдения сигнала на скоростном цифровом осциллографе, генерация широкополосного шумового сигнала ГЛПД 8-миллиметрового диапазона в непрерывном режиме работы реализуется за счет кратковременных повторяющихся цугов колебаний со случайными временными паузами между ними. При этом длительность цуга изменяется от 80 до 200 ns. На рисунке, *a, b, c* приведены реализации сигнала, полученные при разовом запуске развертки осциллографа, при различных токах диода. Как видно на рисунках, частота повторений этих цугов увеличивается, т.е. временной интервал уменьшается по мере увеличения тока через диод. На рисунке, *a* наряду с реализацией процесса длительностью 2000 ns представлена реализация одного релаксационного импульса в более крупном масштабе при длительности развертки 200 ns и токе диода 45 мА.

Анализ реализаций сигнала ГЛПД в режиме генерации хаотических колебаний показывает, что процесс генерации реализуется за счет пролетной неустойчивости в многорезонансной автоколебательной системе и имеет характер релаксационных колебаний. В определенном интервале величин рабочего тока в каждом цуге колебаний просматривается регулярная составляющая с периодом ~ 30 ns, связанная с работой ГЛПД в составе шумового радиолокатора и соответствующая регулярной огибающей спектра шумового сигнала с периодом $f = c/2L = 33$ МГц, $L = 4.5$ м. Эта составляющая хорошо фиксируется на стадии затухания

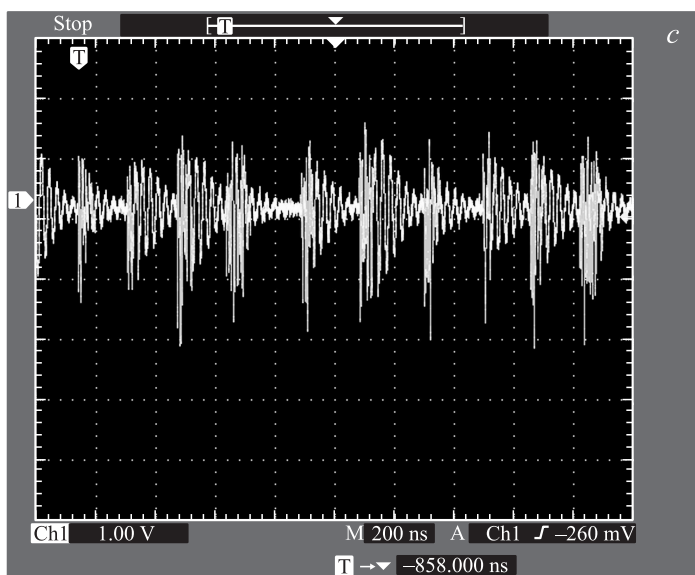
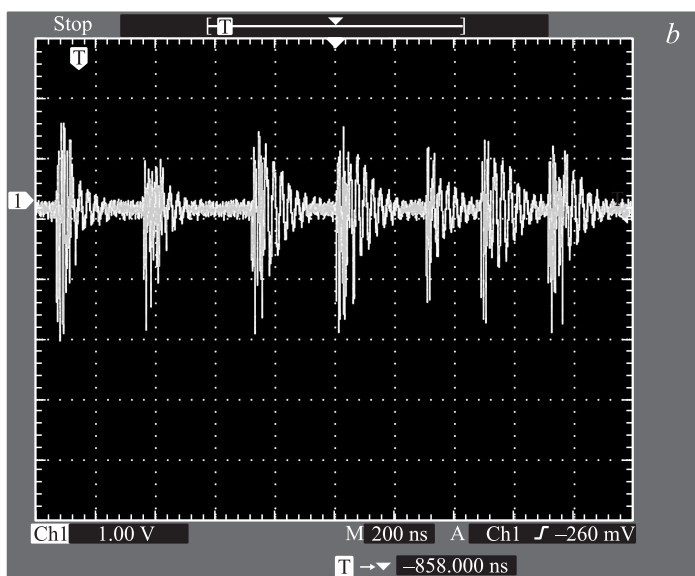


Временные реализации сигнала, полученные при разовом запуске развертки. Токи диода, mA: a — 45, b — 50, c — 55.

колебаний в цуге. Хаотическое разрушение регулярных колебаний осуществляется практически на стадии возникновения ударного возбуждения многорезонансной колебательной системы ГЛПД, но и здесь периодическая составляющая представлена достаточно четко в виде огибающей хаотической „набивки“.

На основании полученных временных реализаций различных режимов генерации хаотических колебаний в ГЛПД можно составить картину перехода от генерации одночастотного сигнала к генерации шума, используя спектральные измерения перехода ГЛПД в режим генерации шума, приведенные в работе [5].

Как только в обратно смещенном $p-n$ -переходе ЛПД приложенное напряжение превышает напряжение пробоя, через диод и во внешней цепи начинает течь постоянный ток. При этом реализуется режим ударной ионизации атомов кристаллической решетки полупроводника [2]. Однако акты ударной ионизации настолько редки и количество



(Продолжение рисунка).

носителей заряда в каждом из них настолько мало, что, даже двигаясь в нужной фазе (при оптимальном угле пролета в пространстве дрейфа), они не могут возбудить колебания в колебательной системе ГЛПД. По-видимому, этот режим отвечает за широкополосный шумовой сигнал, наблюдаемый в ГЛПД до возникновения одночастотной генерации [2], о котором упоминалось ранее. При достижении величиной постоянного тока пускового значения генерации в ГЛПД количество носителей заряда в каждом из актов ударной ионизации становится достаточным, чтобы возбудить колебания в виде коротких цугов, которые хотя и успевают затухнуть, но настолько часты, что приборы с большим временем интегрирования фиксируют непрерывные колебания [5]. Прежде всего, генерация одночастотного сигнала возникает на самой низкой частоте колебательной системы ГЛПД. По мере увеличения тока через диод сначала начинает возрастать мощность этих колебаний, а затем в процесс включаются новые резонансы колебательной системы ГЛПД. Спектр колебаний усложняется и, наконец, становится непрерывным. При этом и паузы между возбуждаемыми цугами колебаний уменьшаются и, наконец, практически исчезают (рисунок, *c*).

Что касается обработки оцифрованных реализаций суммарного сигнала, то получение информации о спектре каждой из них из-за малой их длительности не дало возможности улучшить выделение периодической составляющей $f = c/2L$ по сравнению с регистрацией спектра суммарного сигнала анализатором спектра С4-60 и последующей обработкой протектированного сигнала с его выхода на компьютере [10].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 09-07-13600.

Список литературы

- [1] Тагер А.С., Мельников А.И., Кобельков Г.П., Цебиев А.М. Генерация и усиление радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов с помощью полупроводникового диода в области положительного наклона его статической вольт-амперной характеристики. Диплом на открытие № 24, приоритет 27.X.1959 г.
- [2] Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968. С. 480.

- [3] Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Э.В. Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. / А.с. № 1125735, опубл. 23.11.84г. БЛ № 43 с приоритетом от 22.06.67 г.
- [4] Беляев Р.В., Жерновенков А.С., Залогин Н.Н., Мельников А.И. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 12. С. 1484–1489.
- [5] Мясин Е.А., Котов В.Д. // Радиотехника. 2005. № 3. С. 46–50.
- [6] Misawa T. // IEEE Trans. 1966. V. ED-13. № 1. P. 137–143.
- [7] Пуарье Дж. // Зарубежная радиоэлектроника. 1969. № 7. С. 12–21.
- [8] Мясин Е.А., Котов В.Д. Шумовой радиолокатор. Свидетельство на полезную модель. № 25797. Приоритет от 22.04.2002.
- [9] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1963. С. 481.
- [10] Мясин Е.А., Котов В.Д., Ильин А.Ю., Чмилъ А.И. // Радиотехника. 2005. № 3. С. 36–40.