

07

Воздействие низкочастотного шумового сигнала на генератор одночастотных колебаний миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролетном диоде

© В.Д. Котов, Е.А. Мясин[¶]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
(Фрязинский филиал)[¶] E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 26 апреля 2017 г.

Впервые получена генерация шумовых колебаний в одночастотном автогенераторе на лавинно-пролетном диоде 7 мм диапазона длин волн при воздействии низкочастотным узкополосным (~ 3 МГц) шумовым сигналом на цепь питания лавинно-пролетного диода.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45263.16835

Впервые возможность генерации хаотических колебаний с широким спектром мощности за счет нелинейного взаимодействия многих собственных частот многорезонансной автоколебательной системы была показана в автогенераторе из двух ламп бегущей волны, замкнутых в кольцо, в которой одна из ламп выполняла функцию нелинейного элемента, вторая — усилителя мощности [1–3]. К настоящему времени исследовано множество самых разнообразных автоколебательных систем, демонстрирующих хаотическую динамику как у нас в стране [4], так и за рубежом [5]. С развитием твердотельной СВЧ-электроники оказалось возможным создавать системы в микроволновом диапазоне с использованием, например, транзисторов даже с большей шириной спектра, чем в лампах бегущей волны [6–8]. Однако в миллиметровом диапазоне, который транзисторы только начинают „осваивать“, в твердотельных генераторах приходится использовать лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и диоды Ганна. При этом как для получения моногенерации в генераторе на основе ЛПД (ГЛПД), так и для получения генерации хаотических колебаний используют волноводно-

коаксиальные камеры [9,10], в последнем случае несколько изменив их конструкцию [11,12]. В настоящее время генераторы шума микроволнового и миллиметрового диапазона, использующие хаотическую динамику активных автоколебательных систем, востребованы для самых разнообразных областей науки и техники.

Исследовались и другие методы реализации режимов нелинейной хаотизации колебаний при генерации в ГЛПД. В работе [13] показана возможность хаотизации колебаний в генераторе гармонических колебаний сантиметрового диапазона длин волн за счет воздействия внешнего гармонического сигнала частотой 0.150 МГц на цепь питания такого ГЛПД. В данном случае воздействие низкочастотного (НЧ) сигнала происходит непосредственно на электронный поток, который возбуждает высокочастотную (ВЧ) автоколебательную систему генератора. Однако в этом случае в нелинейном режиме работы ГЛПД генерирует узкополосный шумовой сигнал ~ 14 МГц при неравномерности спектра ~ 10 дБ.

Таким образом, генерацию ВЧ-шумового сигнала обеспечивает нелинейный режим взаимодействия НЧ-гармонического сигнала с генерируемым одночастотным ВЧ-сигналом через изменение параметров электронного потока. Но основная цель экспериментаторов — добиться нелинейной хаотизации колебаний, и тот факт, что это связано с изменением движения носителей в пространстве дрейфа ЛПД, остается без внимания.

В зарубежной литературе в открытом доступе о подобных работах не сообщается. В основном все работы — как теоретические, например [14], так и экспериментальные [15] — направлены на реализацию возможности уменьшения шумовой составляющей в ГЛПД. Однако в [15] используется тот же прием воздействия (синхронизации) на цепь смещения полупроводникового генератора ВЧ-диапазона одночастотным сигналом более низкой частоты, чем его частота генерации. Также теоретически и экспериментально рассматриваются режимы работы ЛПД как источника сверхширокополосного шума в 8 и 3 мм диапазоне волн с полосой шума 25–40 и 53–75 GHz соответственно [16], хорошо известные и реализованные еще в СССР [17], хотя и в сантиметровом диапазоне волн. Имеет место и реклама подобных генераторов шума различными фирмами.

Задача настоящей работы состоит в том, чтобы показать возможность управления характером генерации в ГЛПД даже миллиметрового

диапазона волн путем воздействия шумовым низкочастотным сигналом непосредственно на поток носителей, трансформируя ее в пространстве дрейфа ЛПД в генерацию хаотических колебаний. При этом воздействии происходит разрушение сгустка электронов, взаимодействующего с ВЧ-полем колебаний одной частоты, и ГЛПД превращается в генератор шума.

Теперь рассмотрим процесс генерации одночастотного сигнала в ГЛПД. Известно, что в ГЛПД имеет место зависимость частоты генерации от тока диода. Она перестраивается вверх при увеличении тока через диод. Поэтому любое, даже достаточно медленное, изменение тока ЛПД должно приводить к изменению частоты генератора. И чем больше амплитуда изменения тока через диод, тем шире должен быть диапазон изменения частоты. В связи с этим предлагается генерировать ВЧ-шумовой сигнал в ГЛПД за счет модуляции тока узкополосным НЧ-шумовым сигналом, т. е. воздействовать им на цепь питания ЛПД.

Именно такой способ и был использован для получения генерации шумового сигнала в ГЛПД 7 mm диапазона волн на ЛПД типа КА717Б для различных режимов его работы.

Хотя генераторная волноводно-коаксиальная камера ГЛПД была многорезонаторной и при больших токах могла обеспечивать генерацию широкополосных шумовых колебаний [11,12], в ней имела возможность производить перестройку резонаторов таким образом, чтобы имела место генерация только одной частоты при всех возможных изменениях тока через диод (от 32 до 80 mA).

По мере увеличения тока происходила токовая перестройка частоты генерации, начиная с частоты 38.49 GHz при токе 32 mA и кончая частотой 38.76 GHz при токе 80 mA.

Для проведения эксперимента по воздействию НЧ-шумового сигнала на цепь питания ГЛПД был создан источник низкочастотного шумового сигнала, спектр которого по уровню — 3 dB занимает полосу частот от нескольких kHz до 3 MHz и около 10 MHz по уровню — 10 dB.

Были также исследованы реализации процесса непосредственно на входе ввода питания в коаксиальную линию генераторной камеры с помощью осциллографа С1-75. Было установлено, что плотность распределения вероятности амплитуды напряжения U подчиняется гауссову (нормальному) распределению с нулевым средним. Отклонение

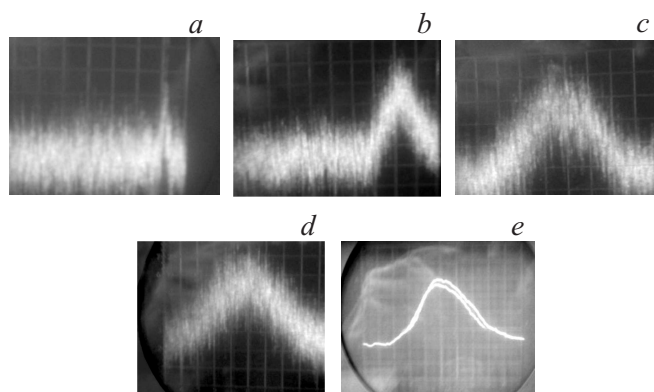


Рис. 1. Зависимость спектра ВЧ-сигнала от амплитуды НЧ-сигнала воздействия: $\sigma = 0$; (a), 0.05 (b), 0.1 (c) и 0.5 V (d,e).

σ определялось по засветке экрана и служило оценкой амплитуды НЧ-шумового сигнала.

Результат воздействия этого НЧ-шумового сигнала для трех его уровней — при отсутствии отклонения или малом ($\sigma = 0.05$ V), среднем ($\sigma = 0.1$ V), максимальном ($\sigma = 0.5$ V) отклонении на цепь питания ГЛПД представлен на фотографиях спектра высокочастотного сигнала 7 мм диапазона волн с экрана анализатора спектра С4-60 при токе через диод 80 и 32 мА на рис. 1 и 2 соответственно.

На рис. 1, a–d масштаб 20 МГц/div, полоса видеофильтра 10 кГц, одна и та же скорость развертки 2 мс/div. На рис. 1, e представлена фотография того же сигнала, что и на рис. 1, d, но полоса видеофильтра 100 Гц, а масштаб 50 МГц/div. Мощность на выходе генератора составляет 5.6 мВт и практически не меняется при изменении уровня НЧ-шумового сигнала.

Как видно из рис. 1, a, в режиме моногенерации при масштабе 20 МГц/div ширина линии совпадает с шириной вертикальной линии масштабной сетки на экране С4-60, но уже при малом уровне внешнего сигнала она имеет ширину ~ 20 МГц. По мере увеличения уровня сигнала ширина спектральной линии возрастает и при максимальном уровне воздействия, как видно на рис. 1, e, достигает ~ 170 МГц по уровню -3 дБ и ~ 250 МГц по уровню -6 дБ. При этом сохраняется

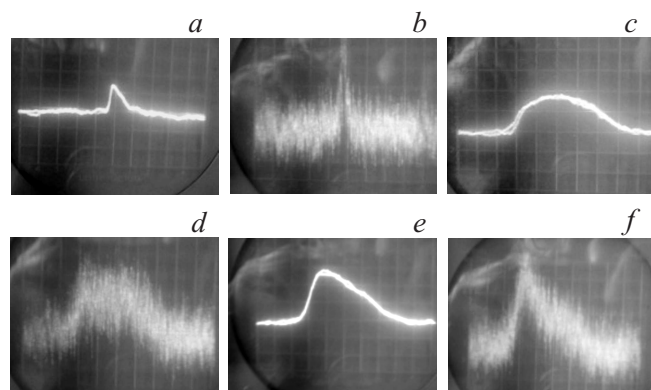


Рис. 2. Зависимость спектра ВЧ-сигнала от амплитуды НЧ-сигнала воздействия: *a, b* — 0 V (10 MHz/div), *c, d* — $\sigma = 0.1$ V (20 MHz/div); *e, f* — $\sigma = 0.5$ V (20 MHz/div).

шумовой характер сигнала с распределением вероятностей, близким к гауссову.

Такая же картина трансформации спектра ВЧ-сигнала наблюдалась при токе диода 50 мА. При воздействии внешнего НЧ-шумового сигнала происходит превращение моногенерации в генерацию шумового сигнала с шириной спектра по уровню -6 dB ~ 250 MHz. Таким образом, ширина спектра шума и в этом случае, как и в случае с рабочим током 80 мА, оказывается равной диапазону токовой перестройки частоты ГЛПД.

Результат воздействия НЧ-шумовым сигналом на цепь питания ЛПД вблизи пускового режима при токе диода 32 мА в зависимости от уровня воздействия для двух значений полосы видеофильтра (100 Hz и 10 kHz) попарно представлен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, вблизи пускового режима генерации также происходит перевод ГЛПД в режим генерации шумового сигнала с распределением, близким к гауссову. Однако ширина спектра в этом случае значительно меньше и определяется только добротностью автоколебательной системы генератора.

Объяснение этому явлению может быть дано с помощью вольт-амперной характеристики (ВАХ) ЛПД после пробоя. При достижении

пускового режима моногенерации и дальнейшем увеличении тока на ВАХ располагается единственная рабочая точка с координатами $U - I$. Это означает, что в пространстве дрейфа диода из потока электронов, движущихся сначала хаотически, под действием ВЧ-поля сформировался сгусток электронов и движется в его тормозящей фазе, отдавая ВЧ-полю свою кинетическую энергию. Воздействие на цепь питания шумовым сигналом приводит к тому, что к данным значениям U и I добавляется шумовая составляющая, изменяющая по случайному закону ток диода. В результате величина постоянного тока, обеспечивающая его величину, необходимую для моногенерации, теперь оказывается „размазанной“ по некоторому диапазону амплитуд σ тока, изменяющегося по случайному закону. Это приводит к разрушению сформированного сгустка электронов и подавлению генерации на одной частоте, а в зависимости от величины этого диапазона σ приводит сначала (в пусковом режиме и вблизи него) к генерации узкополосного шумового сигнала, предельная ширина спектра которого определяется добротностью автоколебательной системы ГЛПД. По мере увеличения рабочего тока относительно пускового (без внешнего НЧ-шумового сигнала) до $I > I_{st}$ происходит перестройка вверх частоты моногенерации от f_{st} до f , что связано с изменением оптимальной для генерации фазы ВЧ-поля. В этом случае увеличение уровня НЧ-шумового сигнала и, как следствие, диапазона изменения тока диода при достаточно большой его величине обеспечивает генерацию широкополосного шумового сигнала с шириной спектра $\Delta F = f - f_{st}$ за счет появления носителей тока, соответствующих „пройденным“ величинам тока при отсутствии модуляции.

В заключение отметим, что, как и в случае нелинейной хаотизации колебаний, в случае модуляции узкополосным НЧ-шумовым сигналом по цепи питания ЛПД генерируемый ВЧ-сигнал является прямошумовым, так как реализуется за счет механизма усиления собственных шумов, связанного с пролетной неустойчивостью.

Фактически генератор переводится в режим регенеративного усиления собственных увеличенных шумов ЛПД.

Таким образом, предложен и продемонстрирован новый способ перевода одночастотной генерации ГЛПД миллиметрового диапазона с узкополосной автоколебательной системой в режим шумовой генерации, причем при слабой нелинейности ее активного полупроводникового элемента.

Список литературы

- [1] Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Э.В. Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. А.С. № 1125735. Опубл. 23.11.84. БЛ № 43 с приоритетом от 22.06.1967.
- [2] Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А. // РЭ. Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 6. С. 1118.
- [3] Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н. // РЭ. 1980. Т. 25. № 10. С. 2160.
- [4] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. // РЭ. 2001. Т. 46. № 5. С. 604–610.
- [5] Kennedy M.P. // IEEE Transac. Circuits Syst. I: 1994. V. 41. Iss. 11. P. 771–774.
- [6] Tamasevicius A., Bumeliene S., Lindberg E. // Electron. Lett. 2004. V. 40. P. 1569–1570.
- [7] Li J.X., Wang Y.C., Ma F.C. // Nonlinear Dyn. 2013. V. 72. P. 575–580.
- [8] Максимов Н.А., Панас А.И. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 3. С. 88–94.
- [9] Misawa T., Kenyon N.D. // IEEE Trans. MTT. 1970. V. MTT-18. P. 969.
- [10] Kenyon N.D. // G-MTT Symp. Digest. 1970. P. 300–303.
- [11] Мясин Е.А., Котов В.Д. // Радиотехника. 2005. № 3. С. 46–50.
- [12] Мясин Е.А., Котов В.Д. Генератор СВЧ шумовых колебаний. Патент № 2614925 РФ. Заявка № 2015154277 от 17.12. 2015. Опубл. 30.03.2017. Бюл. № 10.
- [13] Кокорин И.А. // Электронная техника. Сер. 1. 1984. В. 2. С. 25–27.
- [14] Sjolund A. // Int. J. Electron. 1973. V. 34. N 4. P. 551–564.
- [15] Okamoto H., Ikeda M. Injection-locked ultra-high frequency solid-state oscillator. Patent US 4099144 A. 26.04.1976. Publ. date 04.07.1978.
- [16] Radmanesh M.M., Cadwallader J.M. // Microwave J. 1991. V. 34. N 4. P. 125–133.
- [17] Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968. 480 с.