

06

## Генерирование широкополосного гауссовского случайного сигнала

© Ю.В. Жилияев, Н.Д. Ильинская, А.Н. Ионовенков, А.А. Карпов,  
С.И. Кузнецов, Т.А. Орлова, В.Н. Пантелеев, Е.А. Панютин,  
С.А. Сныткина, О.В. Титкова, Л.М. Федоров, В.П. Хвостиков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Eugeny.Panyutin@pop.ioffe.rssi.ru; eugran@sinet.spb.ru

Поступило в Редакцию 22 января 2010 г.

Изложены общие подходы к проблеме получения гауссовского случайного сигнала, предложен вариант практического создания такого генератора, освещены некоторые технологические аспекты формирования активных структур прибора и приведены спектральные характеристики выходного шумового сигнала. В основу разработки положен принцип аддитивного формирования гауссовского процесса как результат совместной работы группы параллельно включенных источников импульсного сигнала микроплазменного типа. Приборы были реализованы в виде GaAs-микрочипов: методами эпитаксиально-диффузионной технологии создавалась исходная  $p-n$ -структура, на которой средствами микролитографии формировался матричный рельеф элементарных источников шума.

Несмотря на впечатляющие успехи теории случайных процессов [1], проблема практической реализации удобных и миниатюрных источников случайного сигнала, удовлетворяющих современным требованиям как с точки зрения вероятностных характеристик этого сигнала, так и в плане формы его частотного спектра, еще далеко не решена. В то же время потребность в таких приборах для различных приложений (в частности, для последующего получения случайных числовых последовательностей, так как возможности генераторов псевдослучайных чисел уже не соответствуют вычислительным запросам, в особенности при решении многовариантных задач) постоянно возрастает.

При выборе возможного подхода к решению означенной проблемы учитывалось, что для большинства приложений требуется прибор, обладающий приемлемым уровнем выходного сигнала, прозрачными законами, ответственными за его вероятностные свойства, максималь-

ной, по возможности, шириной частотного спектра и, кроме того, совместимостью с современной элементной базой.

Наиболее полно совокупности указанных требований, как представляется, отвечают источники микроплазменного шума (реализующие специальный режим неоднородного лавинного пробоя обратносмещенного  $p-n$ -перехода [2–4]). На их основе уже были разработаны кремниевые шумовые диоды, отличающиеся относительно высоким уровнем сигнала и хорошими эксплуатационными показателями. К недостаткам этого типа генераторов можно было бы отнести заметную ограниченность частотного спектра в области высоких частот (типичные значения частоты, соответствующие уменьшению спектральной плотности шумового сигнала на 3 дВ относительно спектральной плотности в области нижних частот, составляют 3–8 МГц). Кроме того, работа таких диодов обеспечивалась флуктуациями тока лишь единичной „искусственной микроплазмы“, поэтому они могли быть источниками лишь импульсного сигнала (марковского типа [5]); этот сигнал мог бы, в первом приближении, быть аппроксимирован либо процессом, близким к „точечному“ пуассоновскому, либо в некоторых специальных случаях случайным телеграфным сигналом [6].

В то же время публикации, в которых освещались бы разработки, направленные на создание генераторов других классов случайных сигналов (в частности, широкополосного гауссовского белого или „цветного“ шума), представлены явно недостаточно (в основном имеются предложения, касающиеся реализаций генераторов на основе нелинейных систем, демонстрирующих поведение типа странного аттрактора [7–9]). Данное сообщение представляет некоторые предварительные результаты работы, предполагающей хотя бы частично восполнить существующий пробел.

Хорошо известно (см., например, [6]), что переход от случайного сигнала пуассоновского типа, сформированного последовательностью коротких импульсов, к гауссовскому сигналу может быть осуществлен в результате процедуры суммирования реализаций таких импульсных сигналов от достаточного числа взаимно независимых источников. Так что, если  $\xi(t)$  — какая-либо реализация импульсного сигнала, которая могла быть приближенно представлена в виде

$$\xi(t) = \sum_v a_v F_{\tau} \left( \frac{t - t_v}{\tau_v} \right) \quad (1)$$

(где  $F_r(t)$  — идентичные по форме импульсы с характерной (флуктуирующей) длительностью  $\tau_v$ ,  $\{t_v\}$  — пуассоновская последовательность случайных значений времени задержки появления очередного импульса, имеющего амплитуду  $a_v$  (величина которой также может быть случайной), а их средняя длительность удовлетворяет условию  $\langle\langle\tau_v\rangle\rangle \ll \langle\langle t_{v+1} - t_v \rangle\rangle$ ), то случайная функция

$$\Xi(t) = \sum_k \sum_v a_{kv} F_r\left(\frac{t - t_v}{\tau_v}\right), \quad (2)$$

описывающая совместную работу  $k$  источников, будет иметь (при достаточно больших значениях  $k$ ) вероятностное распределение, близкое к нормальному [1].

В основе дальнейшей работы лежит предположение, что некоторая совокупность приборов с  $p$ - $n$ -переходом (в том числе и матрица диодов, имеющих конфигурацию переходов типа искусственной микроплазмы), которая была бы оформлена в виде интегральной схемы, может использоваться в качестве системы параллельно работающих генераторов сигнала.

Как известно, режим стохастической генерации сигнала может быть осуществлен в условиях пространственного ограничения лавинного пробоя (системы, реализующие режимы искусственной микроплазмы, подразумевают в отличие от их естественных аналогов, спонтанно возникающих в окрестностях дислокаций, технологически контролируемое создание псевдоточечной области локально высокого поля обратносмещенного перехода). В кремниевых генераторах для этих целей использовалась локальная диффузия в кольцевое окно [3]; такое решение предполагает использование площади не менее  $200 \times 200 \mu\text{m}$ , что делает затруднительным формирование больших массивов диодов. В то же время потребность в расширении частотного спектра предопределяет в качестве основы выбор GaAs, что до известной степени изменяет технологические акценты: эпитаксиальные GaAs-технологии позволяют частично или даже полностью отказаться от операций локальной диффузии и существенно сократить площадь, необходимую для резервирования под единичный элемент. Кроме того, немаловажное обстоятельство, которое учитывалось при выборе технологии, — требование минимизации концентрации глубоководных центров, негативное влияние которых проявляется в виде тенденции к группированию случайных импульсов [10].

Отмеченным требованиям достаточно полно удовлетворяет газофазный хлоридный эпитаксиальный процесс (т.е. процесс в системе Ga–AsCl<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>), поэтому все исходные структуры были получены в рамках именно этой базовой технологии. Практическое осуществление всего цикла изготовления прибора свелось к двум основным стадиям — получению базовой эпитаксиальной структуры с последующим проведением „мелкой“ финишной диффузии цинка и осуществлению совокупности постэпитаксиальных операций, включающей в себя и литографический цикл с использованием специально разработанных фотошаблонов.

Здесь следует отметить, что одна из ожидаемых и принципиальных проблем, которая может возникнуть на этапе создания таких многоэлементных генераторов, связана с обеспечением функционирования в стохастическом режиме, по возможности, большого числа единичных генераторов. Источник проблемы состоит в том, что режимы случайных пульсаций микроплазменной системы могут быть обеспечены (в отличие от однородного и стационарного лавинного пробоя) лишь для ограниченного („снизу“ и „сверху“) диапазона токов, протекающих через  $p$ – $n$ -переход. Более того, в силу локальных особенностей легирования слоев и связанных с ними особенностей профиля поля, этот диапазон оказывается для каждого из диодов матрицы индивидуальным и специфичным не только по его ширине, но и в смысле его „начальной“ точки. Таким образом, устойчивая совместная генерация возможна лишь для тех (заранее не известных) элементов массива, для которых эти диапазоны режимов генерирования окажутся при данном значении общего совокупного тока соответствующими (с учетом внутренних балластных сопротивлений) текущему поэлементному распределению этого тока. Максимальное число диодов, находящихся одновременно в режиме генерации, очевидно, возможно лишь при максимальном совпадении (при некотором оптимальном значении общего тока) их рабочих диапазонов, поэтому обеспечение высокой технологической однородности приборной структуры в пределах всего поля матрицы является принципиально важным.

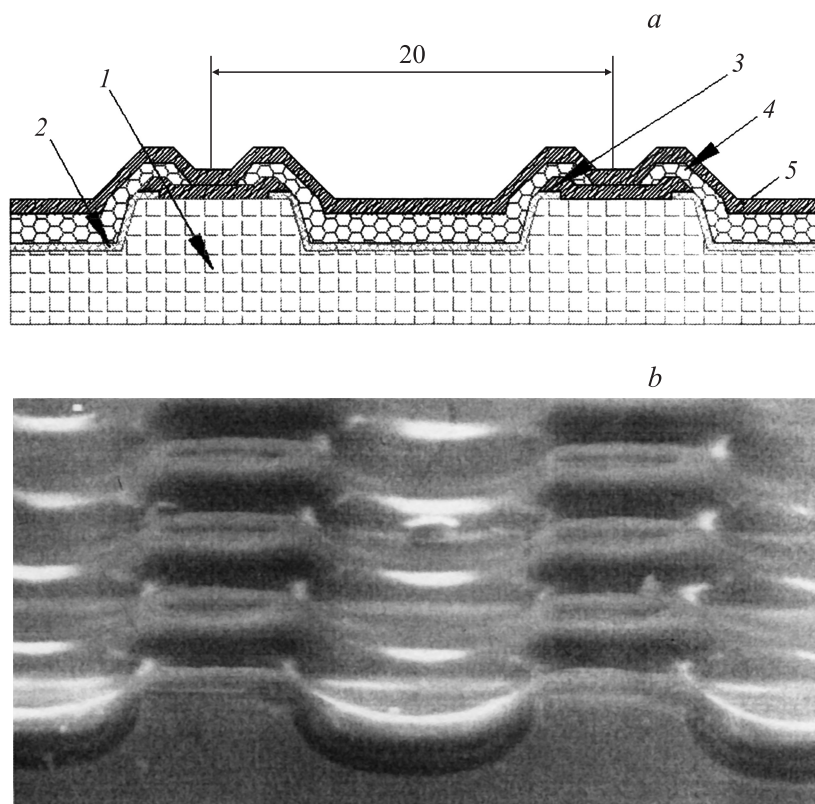
Исходные структуры выращивались на установке горизонтального типа (температура роста  $T = 760^\circ\text{C}$ ); использовались  $n$ -подложки, легированные теллуром и имеющие рабочую поверхность (100) с разориентацией  $4^\circ$ . Эпитаксиальным методом создавались лишь слои  $n^+$  и  $n^0$ . Получение  $p^+$ -слоя с целью достижения наибольшей однородности

перехода осуществлялось методом низкотемпературной ( $T = 560^\circ\text{C}$ ) диффузии из газообразного источника в потоке водорода. В результате этих процедур создавались структуры, имеющие следующую последовательность слоев:  $n_{(\text{Te, substrate})} - n_{\text{Te, } 20\mu\text{m}}^+ - n_{(2\mu\text{m})}^0 - p_{(\text{Zn, } \sim 1\mu\text{m})}^+$ .

Постэпитаксиальный цикл, помимо стандартных операций напыления омических контактов (Au/Ge, Cr–Au) и получения слоя изолирующего окисла  $\text{SiO}_2$  (низкотемпературное плазмохимическое осаждение, толщина слоя  $0.2\mu\text{m}$ ), включал в себя четыре литографические операции: создание меза-рельефа, формирующего матрицу микроплазменных генераторов, получение подконтактных окон в окисле, получение контактных площадок к  $p^+$ -слою (Cr–Au). Кроме того, для увеличения межэлектродной толщины и снижения (впоследствии) влияния паразитных емкостей на одном из последних этапов изготовления структуры было использовано нанесение на рельефную поверхность толстопленочного ( $5\text{--}8\mu\text{m}$ ) покрытия с его последующей двустадийной полимеризацией. В промежуточной фазе, используя технику реактивного травления в кислородно-аргоновой плазме, создавалась вторая группа „контактных“ окон. Заключительная литографическая операция — получение общего контакта (рис. 1), обеспечивающего параллельное соединение меза-диодов (по причине низкой адгезии металлов „золотой“ группы к  $\text{SiO}_2$  был использован Ni).

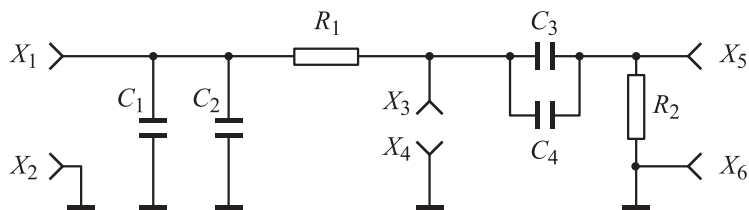
В результате изложенных процедур и последующего разделения пластин были получены приборы типа ИС, представляющие собой чипы с размерами  $1360 \times 1360\mu\text{m}$ , которые содержали матрицы ( $32 \times 32$ ) меза-диодов с геометрией, в определенном смысле моделирующей ситуацию, типичную для микроплазмы (поперечное ограничение области высокого поля малыми размерами, возможность для радиального растекания тока). В связи с этим важно подчеркнуть, что операция получения меза-рельефа в данном случае является чрезвычайно ответственной, так как должно быть использовано такое прецизионное травление, которое обеспечило бы глубину, превышающую глубину залегания  $p$ – $n$ -перехода, не более чем на  $\sim 0.5\mu\text{m}$ .

Предварительное исследование матриц в режиме лавинного пробоя показало, что многие из них при определенных значениях тока входят в стохастический генерационный режим, причем характер флуктуаций тока в этом режиме существенно отличается от вида типичного сигнала, создаваемого единичной микроплазмой, обычно демонстрирующей редкие „пички“ тока с экспоненциальным спадом. В результате



**Рис. 1.** Меза-рельеф и структура контактов фрагмента матрицы формирователя сигнала: *a* — представление микроструктуры в разрезе (размер приведен в  $\mu\text{m}$ ): 1 — подложка с эпитаксиальной *p-n*-структурой; 2 — слой  $\text{SiO}_2$ ; 3 — омический контакт; 4 — полимерное покрытие; 5 — финишная металлизация; *b* — изображение поверхности матрицы, полученное с помощью электронного микроскопа.

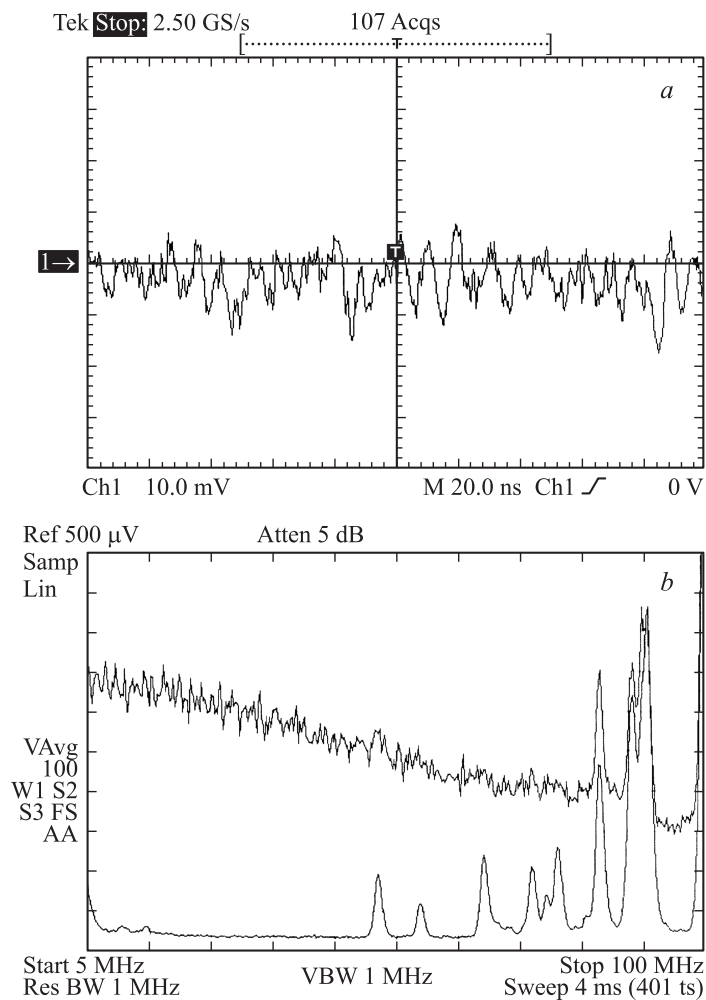
управляемого изменения общего тока, проходящего через систему таких генераторов, возможно изменение и числа диодов (в пределах их общего количества), одновременно находящихся в режиме генерации, и соответственно мощности выходного шумового сигнала, а также, в известной степени, его вероятностных параметров.



**Рис. 2.** Схема включения генераторов случайного сигнала:  $R_1$  — 100 к $\Omega$ ;  $R_2$  — 130 к $\Omega$ ;  $C_1$ ,  $C_3$  — 1  $\mu$ F;  $C_2$ ,  $C_4$  — 1 нF;  $X_1$ ,  $X_2$  — к источнику постоянного напряжения Tektronix PS280 DC Power Supply;  $X_3$ ,  $X_4$  — к исследуемому образцу генератора случайного сигнала;  $X_5$ ,  $X_6$  — на вход измерительной аппаратуры.

Для исследования временных и спектральных характеристик приборов применялись осциллограф Hewlett-Packard 54820A и анализатор спектра Agilent E4403B с высокоимпедансными активными пробниками. Входное сопротивление пробников — не менее 1 М $\Omega$ , входная емкость — не более 0.7–1.0 пF, полоса пропускания анализатора с пробником — от 300 до 3 GHz. Схема подключения исследуемых образцов приведена на рис. 2. Типичный вид временных реализаций сигнала некоторых образцов приборов (рис. 3, *a*) дает основание полагать, что в рассматриваемом случае имеет место совместная параллельная генерация группы источников импульсного сигнала. Характерный вид (рис. 3, *b*) частотной характеристики (зависимости спектральной плотности напряжения сигнала от частоты) показывает наличие сигнала, граничная частота которого по уровню 0.7 составляет, по крайней мере, 50 MHz; такой диапазон многократно шире по сравнению с аналогичными параметрами спектра кремниевых шумовых диодов. На основании характера формы спектральной функции (практически линейный спад, за исключением выброса в области  $\sim$  80 MHz, создаваемого внешней наводкой, частотная характеристика которой отображена нижней кривой на графике рис. 2, *b*) такой сигнал может быть квалифицирован в терминологии „цветных“ шумов, обобщающих понятие белого и имеющих хождение в литературе, как „розовый“ шум для рассматриваемого частотного диапазона.

Как представляется в настоящий момент, разработанная и исследованная матричная структура в интересующем ракурсе еще далека от оптимальной, однако уже просматриваются пути как для повышения выходной мощности сигнала, так и для его дальнейшего „отбеливания“.



**Рис. 3.** Характеристики случайного сигнала, формируемого матрицей микроплазменных GaAs-диодов: *a* — осциллограмма реализации случайного сигнала (Hewlett-Packard 54820A; масштаб: 20 ns на дел., 10 mV на дел.); *b* — частотная характеристика сигнала (анализатор Agilent L4403B; масштаб: 9.5 MHz на дел.;  $0.05 \mu\text{V} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  на дел.). Внизу представлена характеристика собственных шумов прибора.



## Список литературы

- [1] *Гихман И.И., Скороход А.В.* // Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука, 1977.
- [2] *Аладинский В.К.* // ФТП. 1972. Т. 6. С. 2034–2041.
- [3] *Грехов И.В., Серезжин Ю.Н.* // Лавинный пробой  $p$ – $n$ -перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980.
- [4] *Кондратьев Б.С., Соболев Н.А., Тутыгин В.С., Тиранов М.Л.* Препринт ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Л., 1988. Т. 6. № 1252. 58 с.
- [5] *Тихонов В.И., Миронов М.А.* Марковские процессы. М.: Связь, 1977. 488 с.
- [6] *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976.
- [7] *Пономаренко В.П., Матросов В.В.* // ЖТФ. 1997. В. 3. С. 1–8.
- [8] *Джандиери К.М., Качлишвили З.С.* // ФТП. 2005. В. 6. С. 673–680.
- [9] *Карташев В.М., Котов А.Ф., Решетняк С.А., Филимонов Ю.С.* // Письма в ЖТФ. 2000. В. 5. С. 67–75.
- [10] *Буляровский С.И., Серезжин Ю.Н., Ионычев В.К.* // ФТП. 2009. В. 7. С. 980–984.