

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ОБРАТНОГО ТОКА В СТАБИЛИТРОНАХ

А. А. Ковтонюк, Е. И. Шелех

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам защиты информации от несанкционированного доступа в открытых компьютерных сетях и телекоммуникационных системах, причем увеличивается спрос на аппаратные генераторы случайных чисел. Для их реализации используют флуктуационные процессы в полупроводниковых генераторах шума, что позволяет обеспечить необходимую стойкость ключей для шифрующих алгоритмов. Теория и экспериментальные данные по шумовым процессам, относящиеся к полупроводниковым приборам разработки 60 – 80-х гг, не всегда соответствуют новым условиям, поэтому возникает необходимость их проверки и дальнейшего развития [1].

В известных исследованиях в качестве источника шума рассматривается либо процесс лавинного умножения, либо возникновение микроплазмы (МП) [1, 2]. В данной работе исследована возможность одновременного появления этих процессов в реальных приборах.

Исследования проводились на 50 образцах кремниевых стабилизаторов Д814Г1 и 10 образцах Д814Д1. Шумовые сигналы всех исследо-

ванных стабилитронов можно классифицировать на три основных вида: белый шум, случайный телеграфный двухуровневый сигнал и композиция телеграфного сигнала и белого шума. Спектры этих сигналов представлены на рис.1 (*а* – спектральная зависимость сигнала вида «белый шум», *б* – спектральная зависимость сигнала вида «случайный телеграфный двухуровневый сигнал», *в* – спектральная зависимость сигнала вида «композиция телеграфного сигнала и белого шума»).

Следует заметить, что сигнал вида «белый шум» имеет спектр, близкий к равномерному в области частот от 0 до 2 МГц. Спектральная плотность мощности шумовых сигналов рис.1, *б* и *в* имеет подъем в области частот ниже 0,5 МГц и уменьшается в области частот выше 2 МГц. Отдельные экземпляры стабилитронов позволяют получить шумовые сигналы с частотным диапазоном более 3–5 МГц.

При возбуждении МП коэффициент умножения носителей возрастает в области МП и уменьшается вне ее. Если при формировании шумового сигнала МП находится большую часть времени в включенном состоянии, тогда форму шумового сигнала определяет дробовой шум ударной ионизации. Если большую часть времени МП возбуждается, то вне области МП средний коэффициент умножения невелик, пока протекает большой обратный ток. В этом случае форма сигнала представляет собой случайный телеграфный сигнал. Таким образом, в одном сигнале могут сочетаться три вида флуктуаций:

- флуктуации количества носителей в процессе лавинного умножения;
- флуктуации бистабильной МП (возбуждение и выключение МП);
- флуктуации тока, протекающего через область возбужденной МП.

При этом каждый вид флуктуации в отдельности можно упрощенно считать стационарным процессом. Переход из одного состояния в другое, в котором преобладает один из видов флуктуаций, происходит из-за тепловых флуктуаций.

Таким образом, сигнал вида «белый шум» определяется флуктуациями количества носителей в процессе лавинного умножения и имеет достаточно равномерный спектр.

Уровни шумового сигнала типа «случайный телеграфный двухуровневый сигнал» соответствуют включенному или выключенному состояниям МП. В спектре этого сигнала наблюдается подъем спектральной плотности в низкочастотной области.

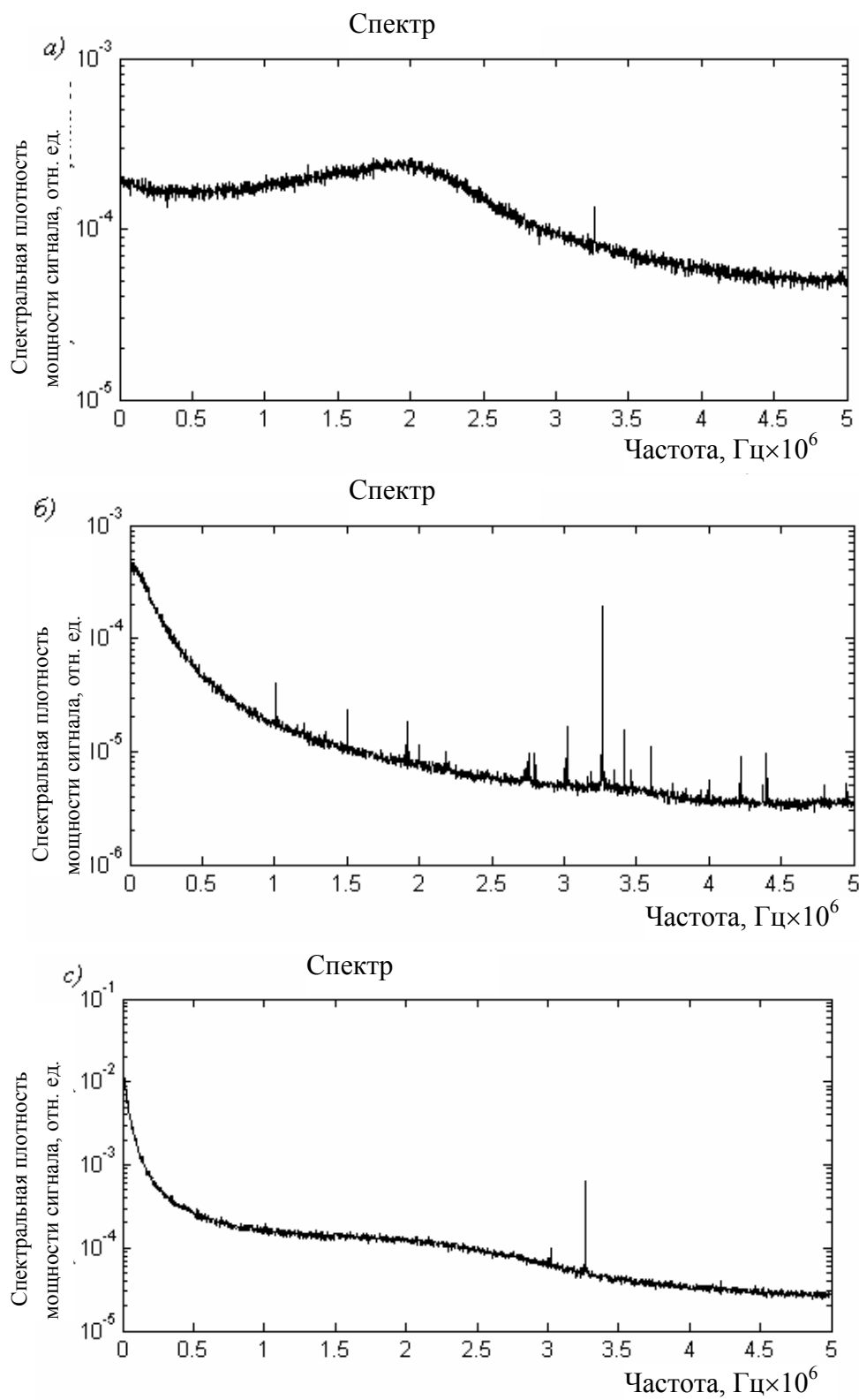


Рис. 1. Спектральные зависимости шумовых сигналов

Для сигнала вида «композиция телеграфного сигнала и белого шума» процессы в МП характеризуются как «состязание» между ударной ионизацией и бистабильными микроплазменными флуктуациями. Спектр этого сигнала имеет подъем спектральной плотности в низкочастотной области и участок с относительно равномерным распределением.

Кроме того, подъем в низкочастотной области спектра может быть вызван дополнительными электротермическими флуктуациями, возникающими на ранней стадии пробоя.

Проведенные исследования показали, что основная доля (более 85 %) исследованных стабилитронов Д814Г1 может быть использована для генерации шумовых сигналов с характеристиками, близкими к характеристикам генераторных диодов КГ401.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с теорией флуктуационных переходов [3]. Эта теория создана для описания флуктуации в сложных системах. В таких системах наблюдаются фазы практически стационарного протекания процессов, перемежаемые фазами нестационарных скачков. Это свойство сложных систем получило название интермиттанса (*intermittence*). Если система имеет два или более устойчивых состояния, то наличие малых флуктуаций приводит к возможности случайных переходов из одного состояния в другое. Изучаемый стабилитрон также является сложной системой. В нем могут происходить различные физические процессы: лавинное умножение носителей; образование МП; возникновение электротермических флуктуаций и другие эффекты.

Таким образом, теория флуктуационных переходов позволяет объяснить наблюдаемое увеличение спектральной плотности шумовых сигналов в области низких частот.

Экспериментальные данные, полученные в данной работе, подтверждают предположение о том, что в режиме лавинного умножения флуктуации имеют спектр, близкий к равномерному. Подъем в низкочастотной области спектра указывает на низкое качество прибора или использование его в неоптимальном режиме.

Литература

1. McIntyre R. J. Multiplication noise in uniform avalanche photodiodes // IEEE Transaction on Device. 1966. V.ED-13. № 1. P.164–168.
2. The Low Frequency Noise in Reverse Biased Rectifier Diodes / Marinov O., Jamal Deen M., Loukanov V., Velikov V. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2002. V. 49. № 1. P. 184–187.
3. Ланда П. С. Теория флуктуационных переходов и ее приложения // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 10. С. 1157–1197.