

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

А.Г.Пархомов

alexparh@mail.ru

На низких и инфранизких частотах (ниже 100 - 1000 Гц) в генерируемых полупроводниковыми приборами электрических флуктуациях преобладает фликкер-шум, спектральная плотность мощности которого возрастает при уменьшении частоты f по закону, близкому к $1/f$ [1,2,5,6] (спектральная плотность мощности широко известного “белого” шума от частоты не зависит). В ряде полупроводниковых приборов наблюдается разновидность фликкер-шума - импульсный (“взрывной”) шум, при котором в случайные моменты времени происходят ступенчатые изменения сигнала между двумя или несколькими уровнями [2,5].

В отличие от белого шума, являющегося результатом наложения происходящих в случайные моменты времени простых однородных событий, фликкер-шум является внешним проявлением совокупности сложных процессов, связанных с накоплением и высвобождением энергии. В полупроводниках такие процессы происходят при взаимодействии носителей заряда с дефектами кристаллической решетки. Вообще же фликкер-шум - широко распространенное явление. Процессы в физико-химических и биологических системах, многие геофизические явления (в том числе, землетрясения), солнечная активность, и даже социальные процессы имеют свойства, характерные для фликкер-шума. Поэтому исследования фликкер-шума в электронных приборах, возможные в лабораторных экспериментах, имеют не только непосредственное практическое значение, но важны и как модель многих природных и социальных явлений.

Фликкер-шум - явление, чувствительное к разнообразным внешним воздействиям [7-9], причем характерной особенностью отклика на внешние воздействия является “двугорбость” - сильный отклик на сильные воздействия, слабый отклик на воздействия средней силы, сильный отклик на слабые воздействия. Защита системы, генерирующей фликкер-шум, от сильных воздействий приводит к тому, что она начинает воспринимать воздействия весьма слабые. Это открывает возможность использовать защищенные от “обычных” воздействий (электромагнитных, термических, акустических и т.п.) фликкер-системы в качестве высокочувствительных универсальных детекторов воздействий неизвестной природы. Сложность реализации этой идеи состоит в том, что реакция фликкер-системы зависит от предыстории внешних воздействий и фазы развития процессов в самой системе, и поэтому отклик на одинаковые внешние воздействия может быть различным.

Сигналы, возникающие в фликкер-системах, шумоподобны. Но в хаотических изменениях отчетливо прослеживаются ритмы с периодами от секунд до многих месяцев. Эти ритмы могут быть связаны как с процессами в самой системе, так и с внешними воздействиями. Сопоставление обнаруживаемых в фликкер-системе ритмов с ритмами внешних воздействий различной природы открывает возможность выяснения влияющих на процессы в этой системе факторов (которые, как правило, далеко не очевидны).

1. Методика экспериментов

Литературные данные [2,5,10] и опыт проведенных нами исследований [7,8] показывают, что наиболее интенсивный фликкер-шум генерируется в поликристаллических полупроводниках, в полевых транзисторах типа металл-окисел-полупроводник (МОП), а также в сплавных биполярных транзисторах, выпускавшихся в 50-е годы. Наиболее отчетливые эффекты наблюдаются в области частот ниже 0,1 Гц, поэтому при проведении экспериментов полоса пропускания тракта усиления и регистрации сигналов ограничивалась сверху частотами 0,1 - 1 Гц. Полоса пропускания снизу не ограничивалась или ограничивалась величиной 0,01 - 0,001 Гц.

Среди поликристаллических полупроводниковых генераторов шума были исследованы фоторезисторы на основе сульфида и селенида кадмия (темновой ток), термостатированные терморезисторы из медномарганцевой оксидной керамики и минерал гематит. Помимо этого, в качестве генераторов шума применяли биполярные и МОП-транзисторы, а также микросхемы. Амплитуда возникающего в этих источниках фликкер-шума - от десятков микровольт до единиц милливольт. После необходимого усиления сигналы, снимаемые с нескольких источников, регистрировали многоканальным самописцем.

Необходимым условием получения достоверных результатов является высококачественная защита от воздействий на генератор шума, усилитель и регистратор факторов, не являющихся объектами исследования (электромагнитных помех, температурных изменений и т.п.). Это достигалось тем, что усилитель с автономным питанием располагали в том же металлическом корпусе-экране, что и генератор шума. Высокая экономичность использованных в усилителях микросхем позволила проводить непрерывные исследования без замены источников электропитания на протяжении многих месяцев. Температурные изменения (не превышавшие 1°C в сутки) контролировали; ряд экспериментов проведен при использовании термостабилизации (дрейф температуры не более $10^{-4}^{\circ}\text{C}/\text{час}$). Помехозащищенность экспериментальных установок проверяли воздействием электростатического поля напряженностью около 10^4 В/м , магнитного поля напряженностью около 100 эрстед, широкополосного электромагнитного излучения, генерируемого при искровых разрядах, изменением температуры корпуса устройства на 10°C . Устройство считалось пригодным для экспериментов, если ни одно из перечисленных воздействий, а также покачивания и легкие удары, не вызывали заметного изменения сигнала. Более подробно методика экспериментов описана в работе [8].

2. Особенности обработки результатов исследования фликкер-шума

При исследовании влияния на фликкер-шум внешних ритмических воздействий для оценочного обнаружения наиболее ярких ритмов можно использовать традиционные методы гармонического анализа. Но необходимо учитывать низкую эффективность этих методов, когда отклик на воздействия неоднозначен. В таких случаях адекватным методом для выявления связи между ритмическим воздействием и эффектом в исследуемой системе является синхронное детектирование (метод наложенных эпох). В связи со сложностью и изменчивостью сигналов, возникающих в фликкер-системах, встает проблема выбора параметров, которые можно использовать при анализе записанных сигналов. Если вариации величины сигнала достаточно велики, такими параметрами могут быть усредненные амплитуда или мощность. Сигналы, имеющие относительно ровный вид, можно характеризовать распределением вероятности появления цугов квазипериодических колебаний, содержащих N пульсаций с периодом T (обычно N лежит в пределах от 3 до 20, а T от нескольких секунд до нескольких минут) [8]. Легче и надежнее анализировать сигналы с резко меняющейся амплитудой. В работе [8] сделан вывод о том, что наиболее отчетливые результаты получаются при анализе распределения во времени моментов перехода от “спокойного” к “шумному” состоянию.

3. Результаты анализа экспериментальных данных

Результаты исследований фликкер-шума в ряде полупроводниковых приборов, полученные с 1985 по 1990 год, отражены в приведенных рисунках.

Рис.1 показывает общий характер долгопериодной ритмики изменения интенсивности флуктуаций в одном из исследованных полупроводниковых устройств - фоторезисторе ФСК-7. Можно заметить полугодовой и околосесячный ритмы. Сопоставление показанной на рис.1 усредненной частоты случаев резкого возрастания интенсивности флуктуаций в полупроводниках

со среднемесячными значениями чисел Вольфа не выявляет очевидных соответствий, хотя на периодограмме (рис. 2) заметен пик, характерный для солнечной активности (26 суток). Значительно отчетливее выделяется 30-суточный период, а также периоды 19,6, 14,5 и 9,9 суток, которые можно интерпретировать как ряд $1, 2/3, 1/2$ и $1/3$ синодического лунного месяца (СЛМ), имеющего среднюю продолжительность 29,5 суток. Анализ методом наложенных эпох, охватывающий десятки лунномесячных циклов, подтверждает наличие в ритмов, тесно связанных с СЛМ. Пример такого анализа показан на рис.3.

Периодограммы показывают наличие в вариациях интенсивности флуктуаций в полупроводниках и других устойчивых ритмов в широком диапазоне периодов - от суток до полугода. Но среди проявившихся ритмов незаметен 7-суточный. Это свидетельствует о незначительности антропогенных воздействий на экспериментальные установки.

На рис.4 слева показан *суточный* ход интенсивности флуктуаций темного тока фоторезистора. Столь отчетливый ритм наблюдается не всегда, но иногда он практически однозначно воспроизводится многие сутки подряд. Обращает на себя внимание сходство его с показанным на том же рисунке суточным ходом макроскопических флуктуаций скорости химической реакции [9], а также случаев развития заболеваний человека [4].

Итак, результаты, полученные при многолетних исследованиях фликкер-шума, позволяют сделать вывод о наличии в вариациях интенсивности инфранизкочастотных флуктуаций в полупроводниковых устройствах ритмов, периоды которых совпадают с периодами известных космических ритмов, причем, как это ни удивительно, ритмы синодического лунного месяца (т.е. изменения взаимного положения Земли, Луны и Солнца) проявляются значительно отчетливее ритмов солнечной активности. Это дает основание усомниться в достаточности объяснения лунных ритмов как косвенного проявления ритмов солнечной активности в сочетании с всеобщим синхронизмом космической ритмики, тем более что исследовавшиеся устройства были весьма тщательно изолированы от механических, электромагнитных, тепловых воздействий - посредников при известных солнечноземных связях (причем отчетливость эффектов возрастала по мере улучшения качества изоляции). Можно предположить, что в описанных экспериментах действует более прямой механизм, что здесь проявилось действие некоторого до сих пор не принимавшегося во внимание агента, обладающего высокой проникающей способностью, на который сильное влияние оказывает изменение гравитационного поля в системе Земля-Луна-Солнце. Сходство ритмики изменения интенсивности флуктуаций в полупроводниках с ритмикой интенсивности флуктуаций в физико-химических системах и числа случаев заболеваний позволяет предположить, что и здесь проявляется действие этого же агента.

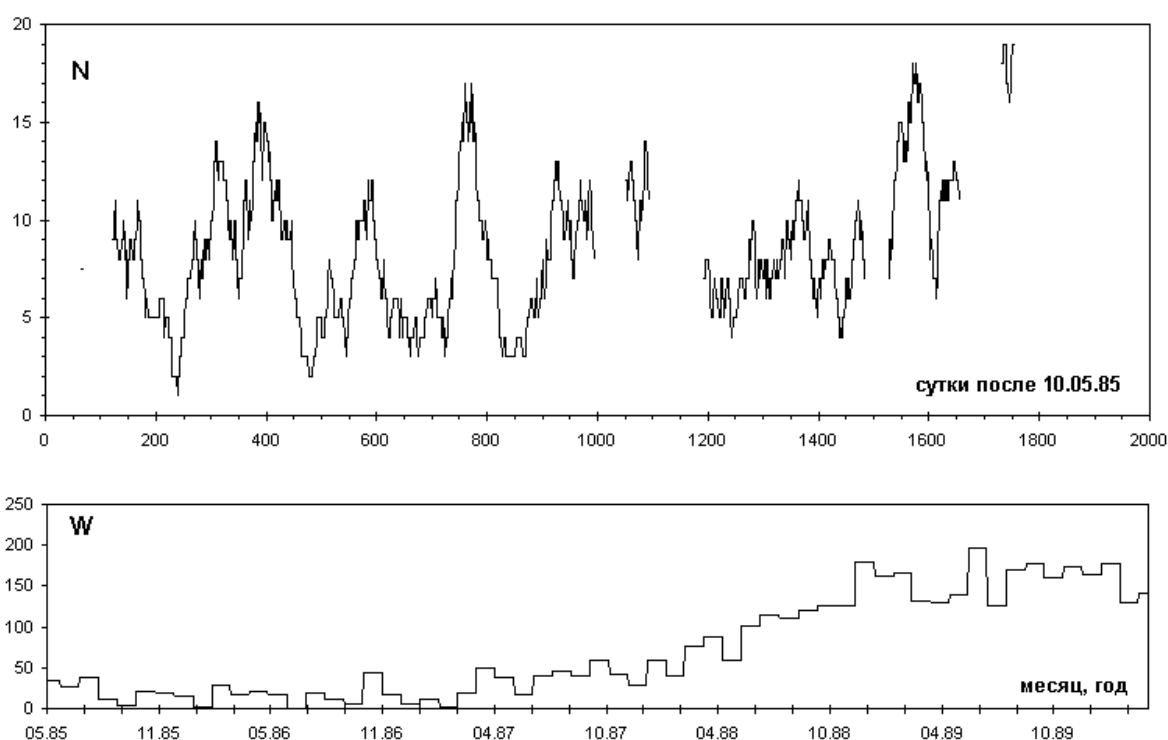


Рис. 1. Число событий N резкого возрастания интенсивности шума темного тока CdS-фоторезистора ФСК-7 (скользящая сумма за 30 дней, отнесенная к середине интервала), сопоставленное со среднемесячными значениями чисел Вольфа W .

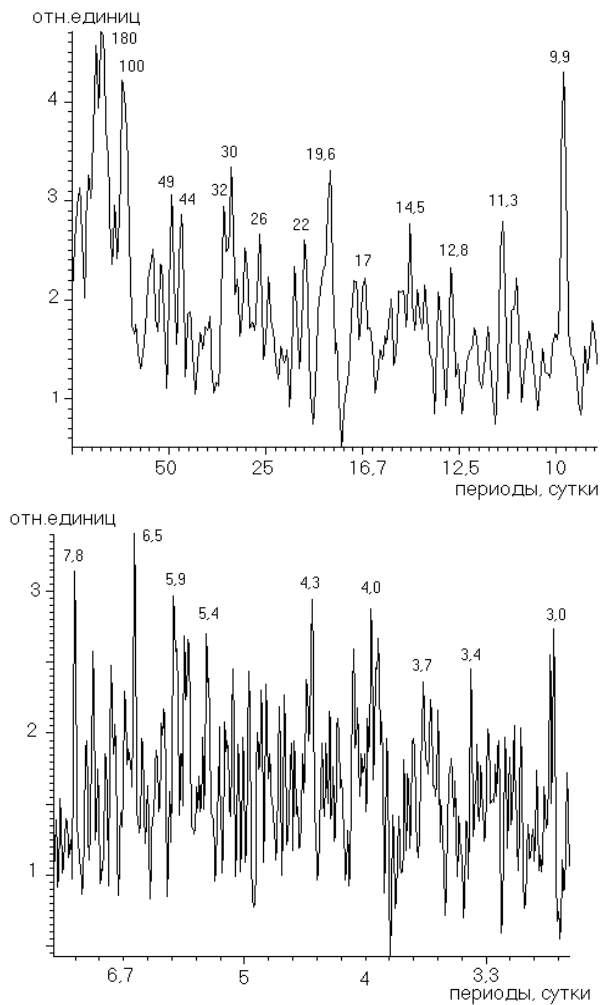


Рис. 2. Периодограмма распределения во времени моментов резкого возрастания интенсивности шума темного тока фоторезистора ФСК-7.

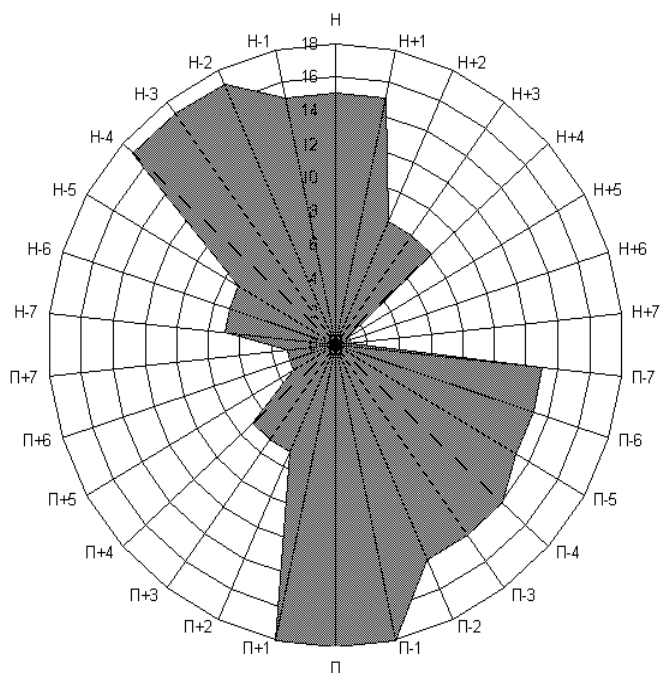


Рис.3. Распределение суммарного числа событий резкого возрастания интенсивности инфранизкочастотных флуктуаций различных источников (биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, фоторезисторы) относительно новолуний (Н) и полнолуний (П). Указаны отклонения от новолуний или полнолуний в сутках. Обобщены результаты, полученные с октября 1984 по август 1986 г.

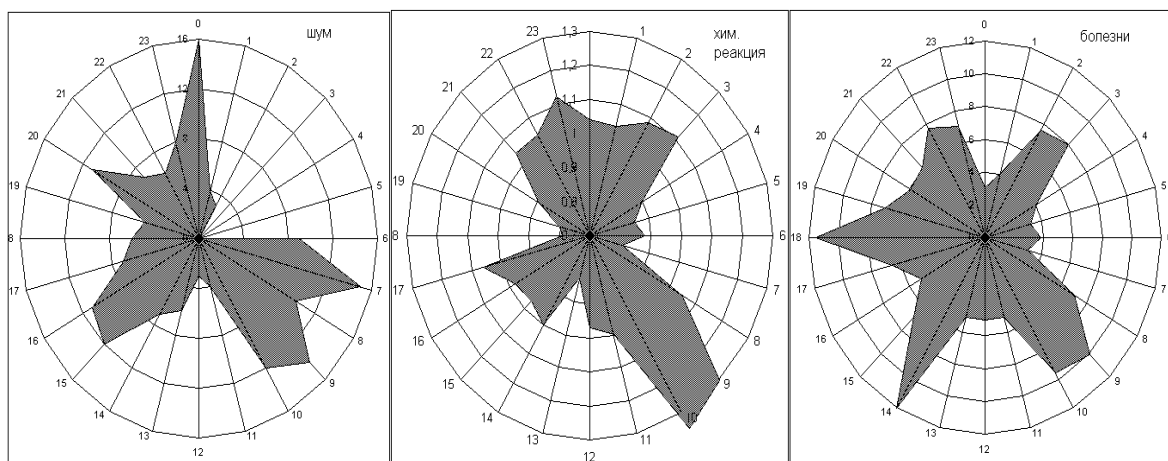


Рис. 4. Слева: суточный ход мощности шума темного тока фоторезистора ФСК-7 (почасовое усреднение на протяжении 8 суток с 24 по 31 августа 1987 г.).

В середине: изменение амплитуды флуктуаций скорости реакции аскорбиновой кислоты с дихлорфенолиндофенолом на протяжении суток [9].

Справа: суточный ход проявления 11 видов заболеваний человека [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю. Е. Новое в исследованиях $1/f$ -шума // Успехи физических наук. 1983. Т. 141. Вып. 1. С. 151-176.
2. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 399 с.
3. Владимирский Б.М., Нарманский В.Я., Темурьянц Н.А. Космические ритмы. Симферополь, 1994. 176 с.
4. Глыбин Л. Я. Проблема биологических часов. Новые данные о закономерностях суточного хода изменений состояния организма человека // Биофизика. 1985. Т.30. С. 717-720
5. Денда В. Шум как источник информации: Пер. с нем. М.: Мир, 1993. 192 с.
6. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа $1/f$ в твердых телах // Успехи физических наук. 1985. Т. 145. Вып. 2. С. 285-328.
7. Пархомов А.Г. Низкочастотный шум - универсальный детектор слабых воздействий. В сб.: Исследование проблем энергоинформационного обмена в природе. М.: СНИО СССР, 1989. Т.1, Ч. 1. С. 209-228.
8. Пархомов А.Г. Экспериментальные исследования инфранизкочастотных флуктуаций в полупроводниках. Закономерности. Космические ритмы. Препринт № 2 МНТЦ ВЕНТ. М., 1991. 24 с.
9. Удальцова Н.В., Коломбет В.А., Шноль С.Э. Возможная космофизическая обусловленность макроскопических флуктуаций в процессах разной природы. Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1987. 96 с.
10. Хейванг В. и др. Аморфные и поликристаллические полупроводники: Пер. с нем. М.: Мир, 1987. 160 с.