

З. А. КОЛОДИЙ, к. т. н. О. Г. КРУК, к. т. н. Ю. В. САНОЦКИЙ,  
к. т. н. В. Д. ГОЛЫНСКИЙ, А. З. КОЛОДИЙ, П. И. ДЕПКО

Украина, г. Львов, НУ «Львовская политехника»  
E-mail: zenoviykol@rambler.ru

Дата поступления в редакцию  
25.03—13.11 2008 г.

Оппонент М. Ф. БОЙКО  
(УНИИРТ, г. Одесса)

## СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ФЛИККЕР-ШУМА С ОСОБЕННОСТЯМИ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ

*В результате компьютерного моделирования хаотического движения элементарных частиц в системах с хаотической и упорядоченной структурой сделан вывод о возможности использования фликкер-шума при анализе надежности элементов электроники.*

Внутренняя структура материала во многих случаях определяет его механические и электрофизические свойства. Наиболее ярким примером этого может быть алмаз и графит, которые имеют одинаковый химический состав, но разную внутреннюю структуру. Большое значение имеет внутренняя структура и для полупроводниковых элементов электроники, поскольку влияет на процессы рассеяния носителей заряда. Особенности структуры материала элемента определяют показатели его надежности. Например, процесс старения элементов электроники (как естественный, так и искусственный), который непосредственно влияет на надежность, напрямую связан с изменением внутренней структуры. Для диагностики внутренней структуры широко используют рентгеноструктурный анализ, однако он требует специального оборудования, кроме того, такой способ диагностики не всегда можно использовать, т. к. это связано с необходимостью демонтажа аппаратуры.

Одним из факторов, чувствительных к особенностям внутренней структуры системы, есть фликкер-шум (ФШ), спектральная плотность мощности которого  $S(f)$ , как известно [1—3], обратно пропорцио-

нальна частоте  $f$ :  $S(f) \sim \frac{1}{f}$ .

В работе [3] рассмотрена перспектива использования анализа хаотических серий динамических переменных различной природы, которые получены при исследовании разнообразных естественных процессов и структур для получения информации о состоянии исследуемой системы, специфики ее эволюции, особенности ее структурной организации и представлены преимущественно в виде временных или пространственных рядов и карт. При этом основное внимание уделяется анализу фликкер-шумовых зависимостей спектра мощности сигнала, который формируется последовательностью  $\delta$ -функций. Информацию о процессах, которые происходят в системе, предлага-

ется определять при интерполяции результирующего спектра мощности, определенного на основе экспериментальных значений временных рядов, по формуле

$$S(f) = \frac{S(0)}{1 + (2\pi f T_0)^n}, \quad (1)$$

где  $S(0)$ ,  $T_0$  и  $n$  — феноменологические параметры („паспортные параметры”), с помощью которых различают исследуемые сложные структуры или эволюцию открытых диссипативных систем. Параметр  $n$  характеризует скорость „потери памяти” (корреляционных связей) в последовательности всплесков на временных интервалах; параметр  $T_0$  имеет смысл времени корреляции;  $S(0)$  — спектральная плотность на средних частотах. Так, при  $n=4$  в исследуемой системе происходит турбулентная диффузия; при  $n=5/3$  — полностью развитая турбулентность и т. д. Сопоставление значений „паспортных параметров”, полученных при анализе временных рядов, с их значениями, определенными для частных случаев, дает возможность хотя бы качественно представить характер тех сложных процессов, которые обуславливают исследуемую эволюцию.

Предложенный в [3] метод фликкер-шумовой диагностики имеет и очевидные недостатки: неудобство определения (скорее, подбор) значений параметров  $T_0$  и  $n$ , при которых выражение (1) с удовлетворительной точностью аппроксимировало бы реальный спектр.

В [4] приведены результаты компьютерного моделирования хаотического движения элементарных частиц, анализ частотного спектра которого подтверждает зависимость ФШ от структуры системы. Предложена эмпирическая формула спектральной плотности флуктуаций  $S(f)$  в изолированных системах, которые находятся в неравновесном состоянии:

$$S(f) \sim \frac{e^{f\tau}}{e^{f\tau} - 1} \frac{hf}{e^{kf} - 1},$$

где  $\tau$  — время релаксации системы.

Для значений  $kT \gg hf$  (что выполняется при  $T \geq 1$  К,  $f \leq 10^9$  Гц) и  $\tau \ll 1/f$  при  $f \rightarrow 0$  выражение для спектральной плотности имеет вид:

$$S(f) \sim \frac{ae^{f\tau}}{e^{f\tau} - 1} \approx \frac{a(1 + f\tau)}{f\tau} = \frac{a}{\tau f} + a. \quad (2)$$

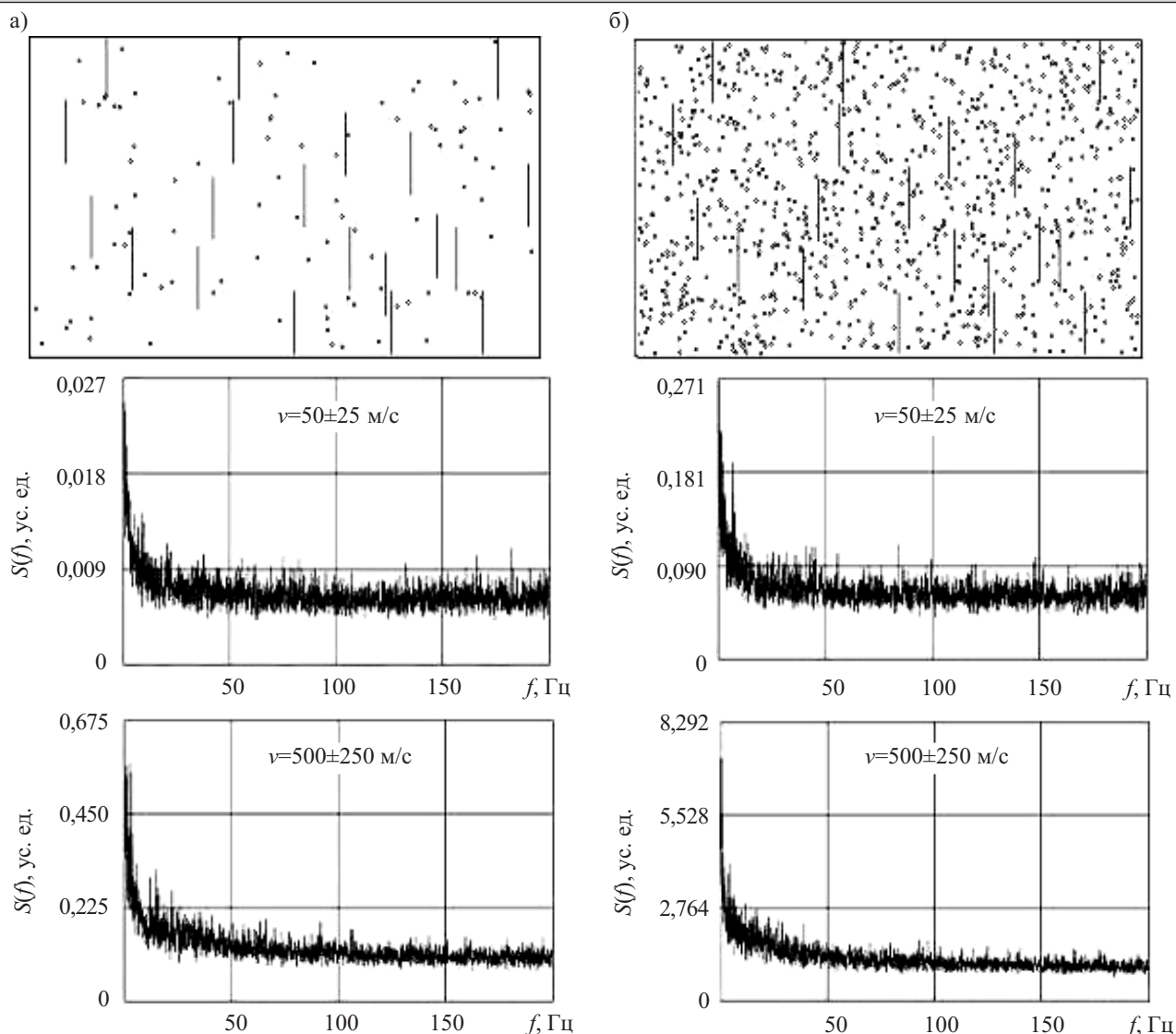


Рис. 1. Модели хаотической структуры со 100 (а) и 1000 (б) частицами и спектр мощности их фликкер-шума при различной скорости движения частиц

Здесь видно, что плотность флуктуаций содержит две составляющие, одна из которых (а) отвечает тепловым флуктуациям (тепловому шуму), а другая со-

ставляющая  $\left(\frac{a}{\tau f}\right)$  — флуктуациям типа  $1/f$  (фликкер-шуму). В отличие от (1), выражение (2) дает возможность по экспериментально определенному спектру  $S(f)$  однозначно определить время релаксации системы  $\tau$ .

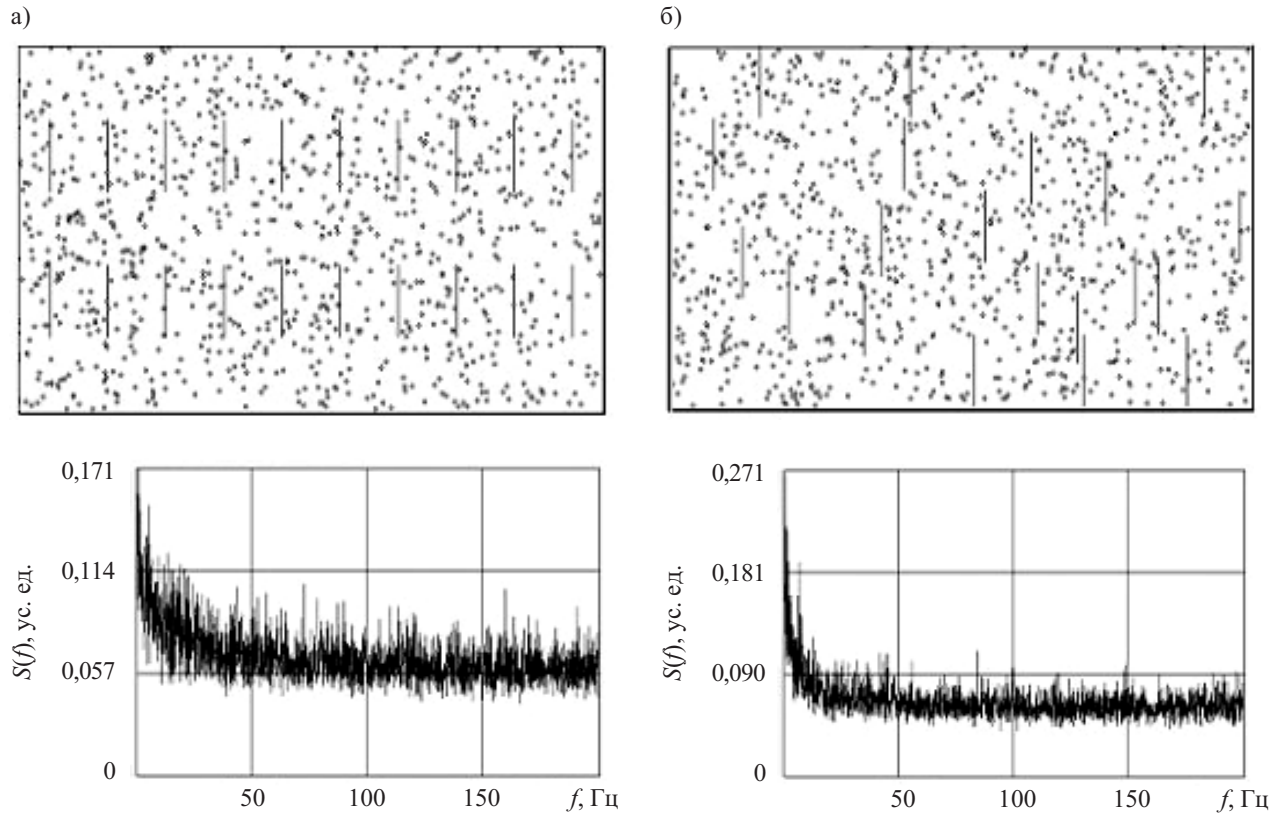
Целью настоящей работы было определение взаимосвязи между параметрами спектральной плотности ФШ  $a$  и  $\tau$  и особенностями внутренней структуры системы, фликкер-шумы которой исследуются. Использовалось компьютерное моделирование хаотического движения элементарных частиц по методике, описанной в [4]. Объектами исследований были выбраны системы с упорядоченной и неупорядоченной структурами. Упорядоченная структура представляла собой плоский прямоугольник с соотношением сторон 1:2 с размещенными в нем в определенном

порядке вертикальными непрозрачными перегородками одинаковой длины. Такая модель соответствует металлическому пленочному гомогенному резистору. В неупорядоченной структуре перегородки расположены хаотично.

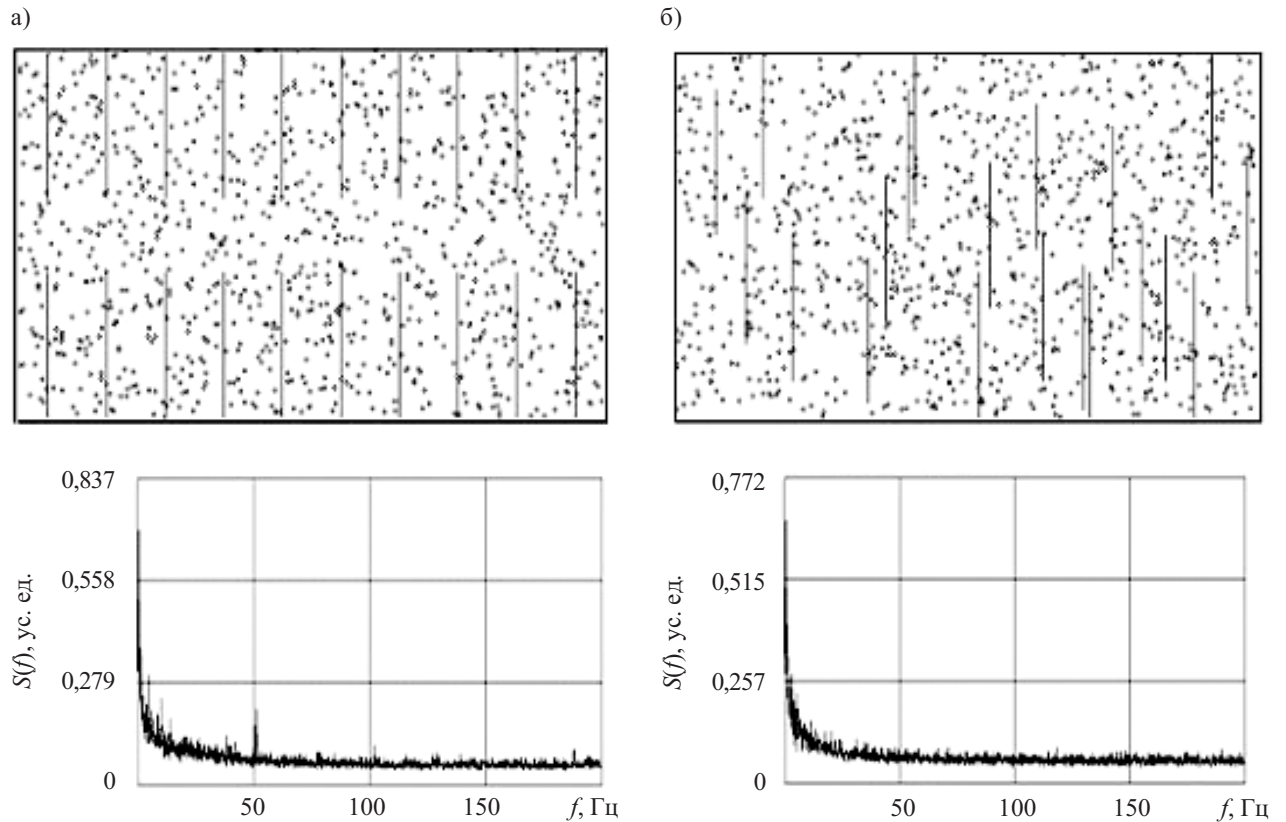
Время релаксации  $\tau$  вычисляли по экспериментально определенному спектру  $S(f)$  из (2):

при  $f = f_0 = \frac{1}{\tau}$  значение спектра мощности  $S(f_0) = 1,58a$ , где  $a$  — значение  $S(f)$  в области средних частот.

В первом эксперименте исследовалась модель неупорядоченной (хаотической) структуры (рис. 1) с различным количеством частиц (100 и 1000 шт) при скорости их движения  $v = 50 \pm 25$  м/с и  $v = 500 \pm 250$  м/с. Значения параметров  $a$  и  $\tau$ , рассчитанные по приведенным спектрам шумов, представлены в табл. 1. Затем рассматривались модели структур с одинаковым количеством частиц (1000 шт) и скоростью их движения ( $50 \pm 25$  м/с), но с различной длиной перегородок  $l$  (0,1 и 0,2 м), различным их количеством  $m$  (20 и 40 шт) и расположением друг относительно друга



**Рис. 2.** Модели равномерно упорядоченной (с расстоянием  $k_2$  между элементами) (а) и хаотической (б) структур с параметрами  $l=0,1$  м,  $m=20$  и спектр мощности их фликкер-шума



**Рис. 3.** Модели равномерно упорядоченной (а) и хаотической (б) структуры с параметрами  $l=0,2$  м,  $m=20$  ( $k_3=k_2$ ) и спектр мощности их фликкер-шума

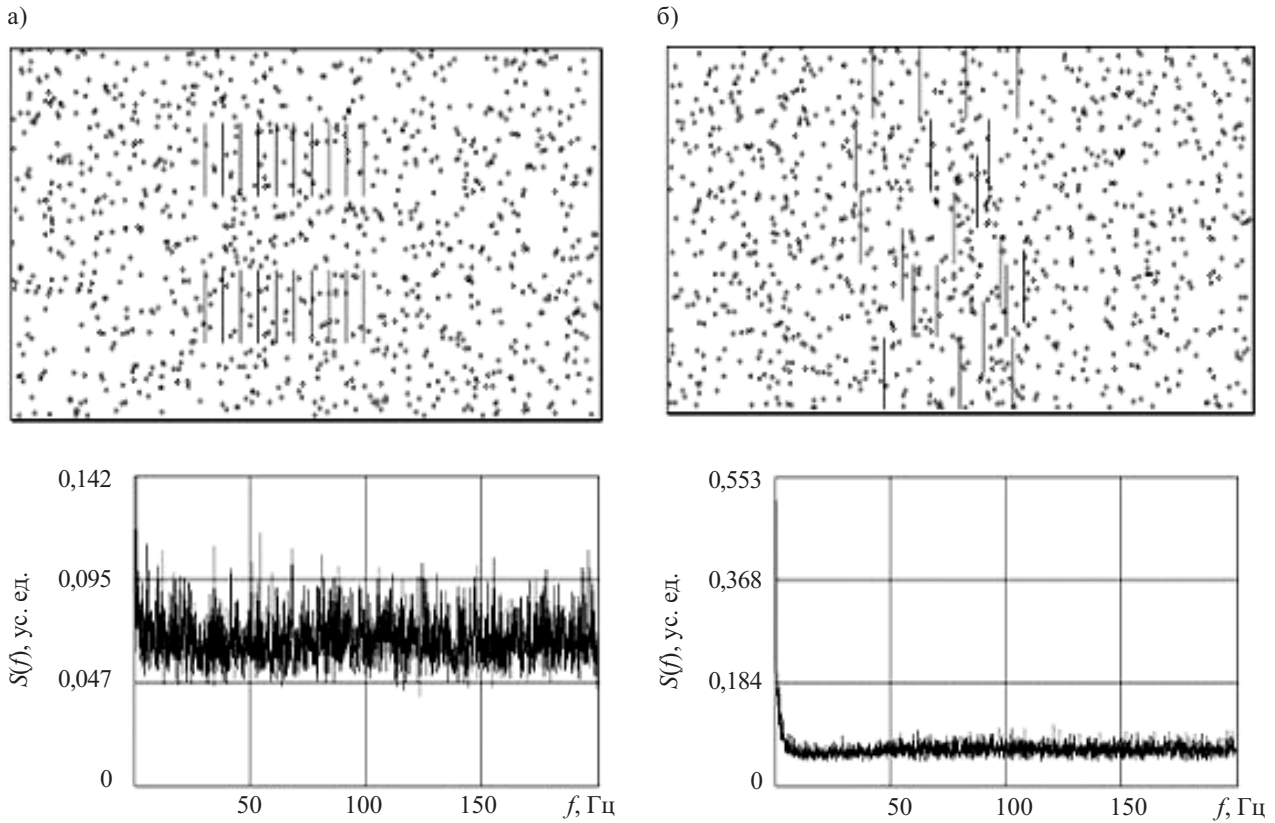


Рис. 4. Модели локально упорядоченной (а) и хаотической (б) структуры с параметрами  $l=0,1$  м,  $m=20$  ( $k_4 \ll k_2$ ) и спектр мощности их фликкер-шума

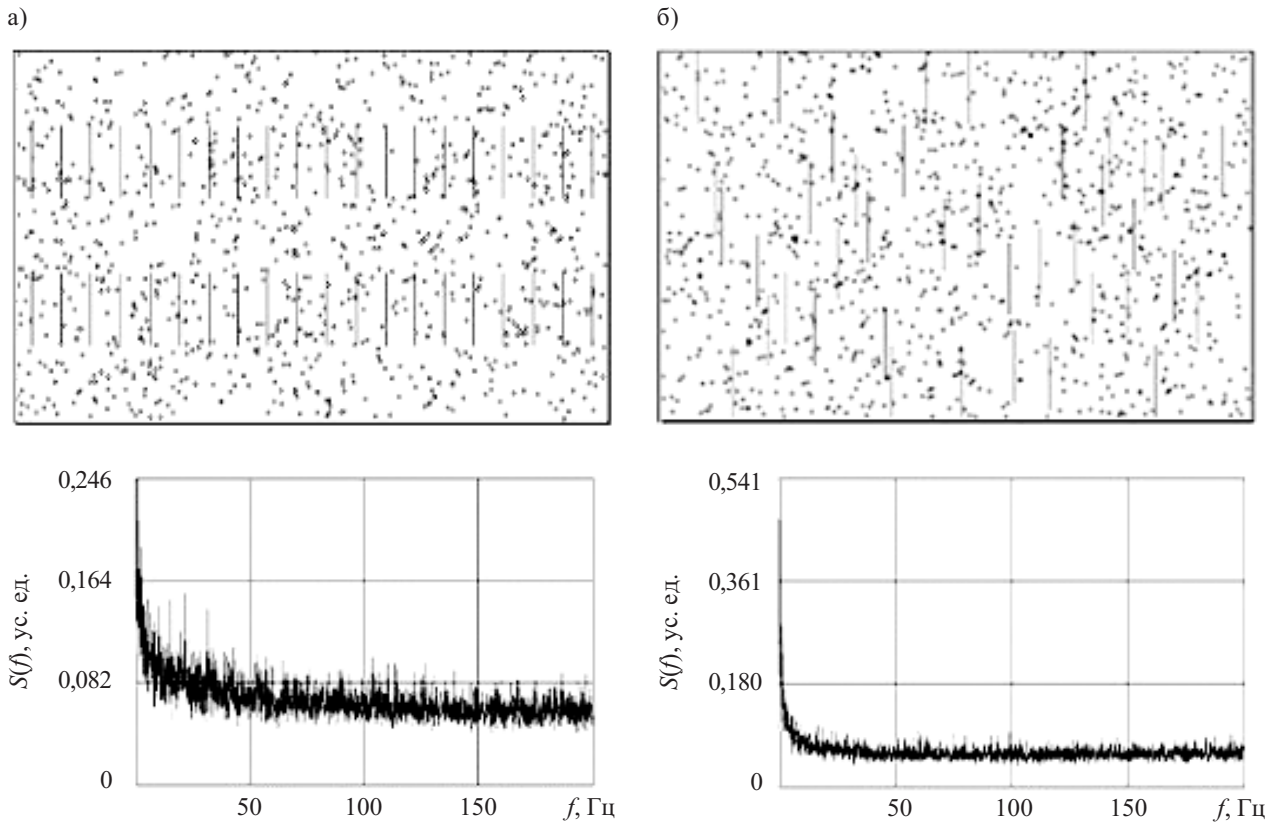


Рис. 5. Модели равномерно упорядоченной (а) и хаотической (б) структуры с параметрами  $l=0,1$  м,  $m=40$  ( $k_5 < k_2$ ) и спектр мощности их фликкер-шума

Таблица 1

Параметры  $a$  и  $\tau$  ФШ хаотической структуры (при  $l=0,1$  м;  $m=20$ ) для различного количества частиц и скорости их движения

Количество, шт	$v$ , м/с	$a$ , Дж	$\tau$ , $10^{-2}$ с
100	50±25	0,0061	12,5
100	500±250	0,104	6,2
1000	50±25	0,061	12,5
1000	500±250	0,995	3,2

(на расстоянии  $k_i$ , равномерное по площади расположение или локальное расположение элементов структуры с уменьшенным расстоянием между ними). Структуры и соответствующие им спектры мощности шумов приведены на рис. 2—5. Значения параметров  $a$  и  $\tau$ , определенные по приведенным спектральным плотностям шумов, представлены в табл. 2.

Результаты компьютерного моделирования и данные, приведенные в таблицах, указывают на то, что значение  $a$  из (2) пропорционально количеству элементарных частиц, которые осуществляют хаотическое движение, и пропорционально средней скорости их движения (табл. 1) и не зависит от количества (рис. 2, 5), расположения (рис. 2, 4) и длины перегородок (рис. 3), т. е. не зависит от внутренней структуры системы (табл. 2). Это может означать, что параметр  $a$  определяется уровнем тепловой энергии, запасенной в системе.

Время релаксации  $\tau$  из (2), в отличие от параметра  $a$ , не зависит от количества частиц, а определяется, в основном, внутренней структурой системы (рис. 2—5, табл. 2) и зависит также от скорости движения элементарных частиц  $\tau \sim 1/v$  (см. табл. 1). Это может означать, что время релаксации характеризует энергию системы, запасенную в ее структуре, — «качественную энергию», причем, чем меньше значение  $\tau$ , тем больше запасается внутренней энергии. Так, системы, которые имеют упорядоченную внутреннюю структуру (рис. 2, а) и время релаксации  $\tau_{уп}$ , запасают меньше энергии, чем системы, которые имеют хаотическую внутреннюю структуру (рис. 2, б) и время релаксации  $\tau_x$ :  $\tau_{уп} > \tau_x$ .

**Выводы**

Анализ спектральной плотности мощности  $S(f)$  смоделированного хаотического движения элементарных частиц подтверждает связь фликкер-шума и внутренней структуры системы.

По экспериментально определенным энергетическим спектрам шумов системы можно определить параметр  $a$  и время релаксации  $\tau$ . Исследуя эволюцию  $\tau$  (по изменению шумов системы), можно сделать выводы об изменениях, которые происходят в структуре системы.

Таблица 2

Параметры  $S(f)$  различных структур с одинаковым количеством частиц (1000 шт) и скоростью их движения ( $v=50\pm 25$  м/с)

Характеристики структуры			Параметр $S(f)$		Изображение модели структуры
$l$ , м	$m$ , шт	Расположение перегородок	$a$ , Дж	$\tau$ , $10^{-2}$ с	
0,1	20	Хаотическое	0,061	12,5	рис. 1, б
0,1	20	Равномерно упорядоченное	0,061	22,0	рис. 2, а
0,1	20	Хаотическое	0,061	12,5	рис. 2, б
0,2	20	Равномерно упорядоченное	0,061	5,0	рис. 3, а
0,2	20	Хаотическое	0,061	4,0	рис. 3, б
0,1	20	Локально упорядоченное, сближенное	0,061	100,0	рис. 4, а
0,1	20	Хаотическое сближенное	0,061	25,0	рис. 4, б
0,1	40	Равномерно упорядоченное	0,061	12,0	рис. 5, а
0,1	40	Хаотическое	0,061	6,0	рис. 5, б

Увеличение значения  $\tau$  свидетельствует о том, что расположение элементов структуры упорядочивается либо расстояние между элементами структуры уменьшается — элементы структуры располагаются локально.

И наоборот, уменьшение значения  $\tau$  свидетельствует о том, что расположение элементов структуры становится хаотическим либо размеры элементов структуры и их количество увеличиваются.

Измеренный шум электронных элементов в диапазоне низких частот (фликкер-шум) содержит информацию об особенностях внутренней структуры элемента, которая влияет на показатели его надежности. Следовательно, анализ фликкер-шума элементов электроники целесообразно использовать при анализе надежности как отдельных элементов, так и функциональных узлов электроники в целом.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Жигальский Г. П. Неравновесный  $1/f$ -шум в проводящих пленках и контактах // Успехи физических наук.— 2003.— Т. 173, № 5.— С. 465—490.
2. Sikula J., Touboul A. Noise in physical systems and  $1/f$  fluctuations // AIP Conf. Proc.— New York.— 1993.— Vol. 285.— P. 206.
3. Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических потоков в распределенных динамических диссипативных системах // Журнал физической химии.— 2001.— Т. 75, № 10.— С. 1900—1908.
4. Колодій З. О. Спектр флюктуацій при моделюванні хаотичного руху в об'єктах, які перебувають у нерівноважному стані // Журнал фізичних досліджень.— 2005.— Т. 9, № 2.— С. 103—111.