

05.3;06

Детерминированный шум в структурах на основе диоксида ванадия

© А.А. Величко, Г.Б. Стефанович, А.Л. Пергамент, П.П. Борисков

Петрозаводский государственный университет
E-mail: velichko@mainpgu.karelia.ru

Поступило в Редакцию 25 декабря 2002 г.

Изложены экспериментальные результаты по исследованию низкочастотных шумов в сэндвич- и планарной структурах на основе диоксида ванадия, обладающих отрицательным дифференциальным сопротивлением. Показано, что спектр наблюдающихся шумов подчиняется зависимости $1/f^\alpha$. Впервые приведены измерения коэффициента α для сэндвич-структуры. На участке вольт-амперных характеристик, соответствующем области переключения, для обоих типов структур зарегистрирован шум, обладающий чертами детерминированного хаоса.

Известно [1], что при приближении к точке потери устойчивости однородного состояния в системах с фазовым переходом металл-изолятор могут возникать низкочастотные флуктуации, подобные турбулентным пульсациям в гидродинамике, иначе называемые детерминированным хаосом. Интерес к изучению шума в структурах на основе пленок оксидов переходных металлов связан с возможностью использования их резкой температурной зависимости физических свойств, а также с изучением физики соответствующего фазового перехода.

Значительное число работ по исследованию перехода металл-изолятор в диоксиде ванадия посвящено эффекту переключения, так как кроме информации о самом фазовом переходе этот эффект в основном определяет области практического приложения VO_2 [2]. Связанное с переходом металл-изолятор электрическое переключение в VO_2 наблюдается в монокристаллах [3], в тонкопленочных планарных структурах [4], в сэндвич-структурах V- VO_2 -металл [5], а также в различных VO_2 -содержащих системах [6,7].

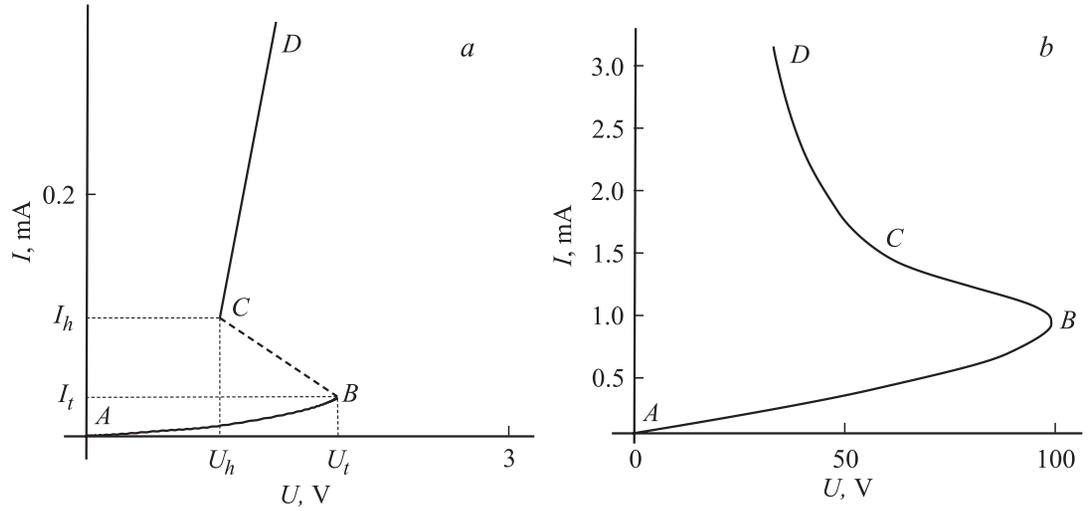
В большинстве работ по изучению шумов в структурах на основе диоксида ванадия основное внимание уделяется определению спектра шума [4,8]. С другой стороны, значительный интерес представляет

анализ шума с использованием методов нелинейной динамики, в частности оценка фрактальной размерности аттрактора шумовых колебаний. Такие исследования определяют, является ли шум стохастическим или детерминированным, что в совокупности со спектральным анализом может указать на физический механизм возникновения данных шумов.

Методика изготовления сэндвич переключателей на основе анодного аморфного оксида ванадия изложена в [9]. Отметим, что формируемый канал состоит из диоксида ванадия, имеющего кристаллическую структуру. Вольт-амперная характеристика сэндвич-переключателя показана на рисунке, *a*. Планарные переключатели представляли собой напыленную на сапфировую подложку (методом реактивного магнетронного распыления [10]) поликристаллическую пленку VO_2 с нанесенными сверху алюминиевыми контактами. Для измерения вольт-амперной характеристики (см. рисунок, *b*) использовалась стандартная четырехзондовая методика.

Для объяснения переключения в структурах на основе двуокиси ванадия в области комнатных температур обычно привлекается модель критической температуры [2]. Согласно этой модели, джоулев разогрев материала протекающим током до температуры перехода металл-изолятор приводит к скачку проводимости, что обуславливает формирование на вольт-амперной характеристике участков с отрицательным дифференциальным сопротивлением *S*-типа. Условно вольт-амперную характеристику сэндвич-переключателя (см. рисунок, *a*) можно разбить на пять областей: 1 — высокоомное состояние (участок *AB*), 2 — высокоомное предпороговое состояние (окрестность точки *B*), 3 — область отрицательного дифференциального сопротивления (участок *BC*), 4 — низкоомное предпороговое состояние после переключения (окрестность точки *C*), 5 — низкоомное состояние после переключения (участок *CD*). Такое же разделение на области можно принять и для вольт-амперной характеристики планарного переключателя (см. рисунок, *b*).

Было проведено измерение (оцифровывание) шумов на всех областях вольт-амперных характеристик, кроме области 3 сэндвич-переключателя, где рабочая точка является неустойчивой, и области 4 планарного переключателя из-за отсутствия резкой границы между 3- и 5-й областями. Диапазон измеряемых частот был в пределах $10-10^3$ Hz.



ВАХ-сэндвич- (a) и планарного (b) переключателей (U_t, I_t — напряжение и ток включения, $U_h I_h$ — напряжение и ток поддержания).

Сэндвич-переключатель					
№ области	1	2	3	4	5
$I, \mu A$	10	30	—	100	200
α	1.3	1.2	—	0.2	1
D	∞	5	—	2.4	∞

Планарный переключатель					
№ области	1	2	3	4	5
I, mA	0.2	1	1.5	—	3
α	1.28	1.77	1.6	—	1.2
D	∞	2.3	2.2–2.8	—	∞

Для оценки фрактальной размерности аттракторов регистрируемых шумовых колебаний использовался корреляционный интеграл [11], определяемый по формуле:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |x_i - x_j|),$$

$$N \rightarrow \infty (i \neq j),$$

где r — размер ячейки разбиения фазового пространства, $N = 10000$ — число точек исходной реализации, H — функция Хевисайда ($H(s) = 1$ при $s > 0$ и $H(s) = 0$ при $s < 0$), $x_i = x(i\Delta t)$, Δt — шаг дискретизации. Наклон линейного участка $\ln C(r) = f(\ln(r))$ определяет искомое значение фрактальной размерности D пространства вложений аттрактора. Заметим, что величина $N_0 \geq \text{int}|D| + 1$ определяет число дифференциальных уравнений первого порядка, необходимых для описания физического поведения исследуемой динамической системы. Для стохастического (недетерминированного) шума наклон $\ln C(r) = f(\ln(r))$ не достигает насыщения и размерность D принимается за бесконечность.

Спектр шума на всех участках вольт-амперных характеристик хорошо подчиняется зависимости $1/f^\alpha$. Результаты измерения коэффициента α и D при различных токах I , соответствующих пяти областям вольт-амперных характеристик, приведены в таблице.

Для области 1 как в сэндвич-, так и в планарной структуре коэффициент α согласуется с результатами работ по измерению коэффициен-

та α при малых токах для монокристаллов [4] и поликристаллических пленок VO_2 [8,12]. Избыточный низкочастотный шум в данной области является стохастическим, источником которого являются дефекты структуры [12].

В области 5 наблюдается пониженное значение α по сравнению с областью 1, что характерно для шумов при наличии канала металлической фазы [4]. Шум в этой области также не обнаруживает детерминированного поведения.

В низкоомной предпороговой области вольт-амперной характеристики сэндвич-переключателя (области 4) фрактальная размерность аттрактора имеет конечное значение. По всей видимости, на данном участке кроме относительно слабого стохастического избыточного шума, обусловленного сопротивлением низкоомной области канала, проявляется другой источник избыточного шума, обладающего детерминированной природой. Физическим механизмом этих колебаний могут служить хаотические пульсации и блуждания токовых нитей, образующихся в предпороговой области переключения. Одним из источников детерминированного шума в этом случае являются генерационно-рекомбинационные эффекты в сочетании с поперечной диффузией в элементах отрицательного дифференциального сопротивления S -типа [1]. Для сэндвич-переключателя предпочтительней, по нашему мнению, связать токовые флуктуации с неустойчивостью самого перехода металл-изолятор. На это указывает полученное аномальное значение $\alpha \approx 0.2$, не согласующееся со спектром шума, обусловленного генерационно-рекомбинационными эффектами [13], а также обнаруженный недавно детерминированный характер хаотических колебаний сопротивления пленки VO_2 в пределах петли гистерезиса [14].

Для области 2 сэндвич-переключателя наблюдается повышенное значение D и α по сравнению с областью 4, что указывает на большую долю стохастической составляющей избыточного шума.

Для планарного переключателя шум на ярко выраженном участке отрицательного дифференциального сопротивления (область 2,3) является детерминированным со значением D в диапазоне от 2.2 до 2.8. На основании работы [15], в которой обнаружена доменная структура кристаллических пленок VO_2 в области перехода металл-изолятор, можно предположить, что данный шум, обладающий чертами детерминированного хаоса, обусловлен именно движением доменов от одного электрода к другому [4]. Возникновение домена может быть

обусловлено генерационно-рекомбинационной неустойчивостью, на что указывает значение $\alpha \approx 2$ [13].

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования России № PD02-1.2-183 и гранта Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) № PZ-013-02.

Список литературы

- [1] Шелль Э. // Самоорганизация в полупроводниках. М.: Мир, 1991. 456 с.
- [2] Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. // Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979. 183 с.
- [3] Mansingh A., Singh R. // J. of Phys. C. 1980. V. 13. N 33. P. 5725-5733.
- [4] Алексеюнас А., Барейкис В., Бондаренко В., Либерис Ю. // ФТТ. 1978. Т. 20. В. 7. С. 1980-1984.
- [5] Remke R.L., Walser R.M., Bene R.W. // Thin Solid Films. 1982. V. 97. P. 129-143.
- [6] Васильев Г.П., Сербинов И.А., Рябова Л.А. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. В. 8. С. 342-344.
- [7] Higgins J.K., Temple B.K., Lewis J.E. // J. Non-Cryst. Solids. 1977. V. 23. P. 187-215.
- [8] Андреев В.Н., Захарченя Б.П., Капшин Ю.С., Носкин В.А., Чудновский Ф.А. // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. В. 4(10). С. 1353-1362.
- [9] Chudnovskii F.A., Stefanovich G.B. // J. Solid State Chem. 1992. Т. 98. P. 137-145.
- [10] Pergament A.L., Stefanovich G.B. // Thin Solid Films. 1998. V. 322. P. 33-36.
- [11] Мун Ф. // Хаотические колебания. М.: Мир, 1990. 312 с.
- [12] Байдакова М.В., Бобыль А.В., Маляров В.Г., Третьяков В.В., Хребтов И.А., Шаганов И.И. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 13. С. 58-64.
- [13] Якубович Б.И. // Электрические флуктуации в неметаллах. СПб.: Энергоатомиздат, 1999. 208 с.
- [14] De Almedia L.A.L., Deep G.S., Lima A.M.N., Nef H. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. N 26. P. 4365-4367.
- [15] Fisher B. // J. Phys. C: Solid State Phys. 1976. V. 9. P. 1201-1207.