

06; 09

© 1991 г.

ДЕКОМПОЗИЦИЯ $1/f$ ШУМА НА ОТДЕЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В $Cd_xHg_{1-x}Te$

И. С. Бакиш, Е. А. Сальков, Б. И. Хижняк

В избыточном шуме монокристаллического $Cd_xHg_{1-x}Te$, содержащего дислокационные скопления, перемежаемость лоренцевских компонент позволила выделить их из суммарного $1/f$ спектра.

Введение

Существующие теории $1/f$ шума в твердых телах исходят из двух взаимно исключающих гипотез об элементарных составляющих измеряемого шума: предполагается, что $1/f$ шум является суперпозицией процессов, имеющих лоренцевский спектр

$$S_L(f) = A\tau/[1 + (2\pi f\tau)^2]$$

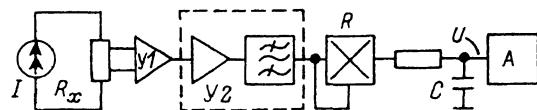
с непрерывным [1-3] или дискретным [4] набором времен релаксации τ (A — параметр, характеризующий мощность элементарного процесса), либо что независимые составляющие $1/f$ шума сами имеют $1/f$ спектр [5-8], так что невозможно выделить физически существующие компоненты, ответственные только за некоторые спектральные составляющие (см. также [9, 10]). Весомым аргументом в поддержку первой группы теорий является то, что при уменьшении размеров систем и снижении температуры в избыточном шуме удается выделить отдельные лоренцианы [11, 12]. Мы получили еще одно независимое подтверждение этих представлений, обнаружив избыточный шум, в котором случайное «включение» и «выключение» некоторых лоренцевских компонент позволило поочередно увидеть как суммарный $1/f$ спектр, так и некоторые его составляющие.

Образцы. Методика и результаты эксперимента

При исследовании шумов в монокристаллическом $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0.20$), выращенном методом твердотельной рекристаллизации и отожженном в условиях, способствовавших перемещению дислокаций, мы обнаружили, что при переходе от участков пластины, не содержащих границ зерен, к участкам, в которых отдельные субзерна были разделены рядами обособленных дислокаций и дислокационными скоплениями, и далее к участкам, содержащим сплошные малоугловые границы зерен, избыточный шум, возрастая по величине, проходит через стадию, на которой в суммарном $1/f$ спектре удается выделить отдельные лоренцевские составляющие, причем независимый характер появления и исчезновения компонент (так называемая «перемежаемость» [13]) позволил установить, что они связаны с различными типами взрывных шумов. Детали этих исследований будут опубликованы в другом месте. В данной работе представлены результаты, подтверждающие композиционный характер $1/f$ спектра.

Сходные результаты были получены на трех близлежащих участках одной пластины. Приведенные ниже данные относятся к одному из них. Образец, из-

готовленный из химически полированного с двух сторон, приклеенного к кремниевой подложке слоя, был получен с помощью фотолитографии и представлял собой полосу толщиной 36 мкм, шириной 250 мкм, с отводами на расстоянии 1.4 мм, на которых были изготовлены малощумящие омические контакты аналогично [14]. Концентрация электронов и холловская подвижность составляли $1.8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $1.2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 77 К и $1.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $1.2 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 295 К. Представленные шумовые данные получены при комнатной температуре по стандартной четырехзондовой методике в диапазоне частот $2-2 \cdot 10^4$ Гц 200-канальным анализатором спектра СК4-72, работающим в реальном масштабе времени. Обычно использовали частотные диапазоны 50, 500, $5 \cdot 10^4$ Гц. При стабильном во времени шуме значения спектральной плотности на перекрывающихся частотных интервалах совпадали в пределах погрешности измерений.



Во избежание переходных искажений, возникающих при включении и выключении отдельных компонент, проводили многократное повторение измерений. Каждое измерение представляло результат усреднения от 128 до 1024 статистически независимых реализаций спектра. Принимались во внимание только те результаты, которые воспроизводились в пределах ошибки 2-5 раз.

Мы контролировали также так называемый «шум дисперсии» [9, 15]. Схема измерений не отличалась от общепринятой и приведена на рис. 1 вместе с ти-

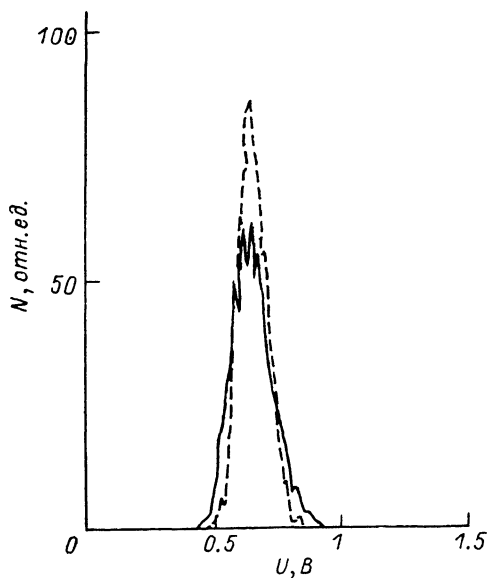


Рис. 1. Схема измерения шума дисперсии и типичные гистограммы распределения дисперсии избыточного шума при частоте выборок 10^2 Гц, времени накопления 30 с, $f_1=1$ кГц, $f_2=10$ кГц, и $\tau_0=13$ мс.

Сплошная линия — данные для рассматриваемого в работе шума ($F=1.4 \cdot 10^{-2}$), штриховая — «контрольный» $1/f^{1.10}$ шум ($F=7.5 \times 10^{-3}$).

пичными результатами. Избыточный шум, возникающий в образце R_x при протекании постоянного тока от генератора тока I , усиливался малощумящим предварительным усилителем $U1$ и основным усилителем $U2$ (в качестве которого использовался измерительный усилитель У7-1), который одновременно формировал полосу частот пропускания (f_1, f_2). Затем шум возводился в квадрат перемножителем, собранным на микросхеме 525ПС2, и экспоненциально усреднялся с постоянной времени $\tau_0=RC$. Полученный таким образом сигнал U поступал на амплитудный анализатор A (многоканальный интегратор Я4С-78). По гистограмме рассчитывали параметр F , характеризующий «дисперсию дисперсии» шума $F=\sigma_{\eta}^2/\sigma_{\xi}^4$, где σ_{ξ}^2 и σ_{η}^2 — соответственно оценки дисперсии для самого шума и его квадрата [15].

Токовая зависимость спектральной плотности избыточного шума была квадратичной в пределах более чем десятикратного изменения тока при неизменном количестве спектральных компонент. Это свидетельствует о равновесном происхождении рассматриваемых шумов. Кроме того, в специально поставленных опытах мы убедились, что появление и исчезновение компонент обусловлены собственными процессами в образце, а не внешними условиями — вибрациями, дрейфами тока и (или) температуры.

Полученные спектры избыточного шума представлены на рис. 2. В течение определенных промежутков избыточного времени (от нескольких секунд до десятков часов)

на осциллограммах отчетливо выделялись отдельные случайные телеграфные компоненты в виде взрывных шумов, а в спектрах — участки лоренцевской формы. «Включение» и «выключение» отдельных взрывных компонент происходило в случайные моменты времени. Некоторые характерные устойчивые результаты представлены на рис. 2 точками и крестиками, а соответствующие лоренцианы — штриховыми линиями. Параметры лоренцианов даны в таблице.

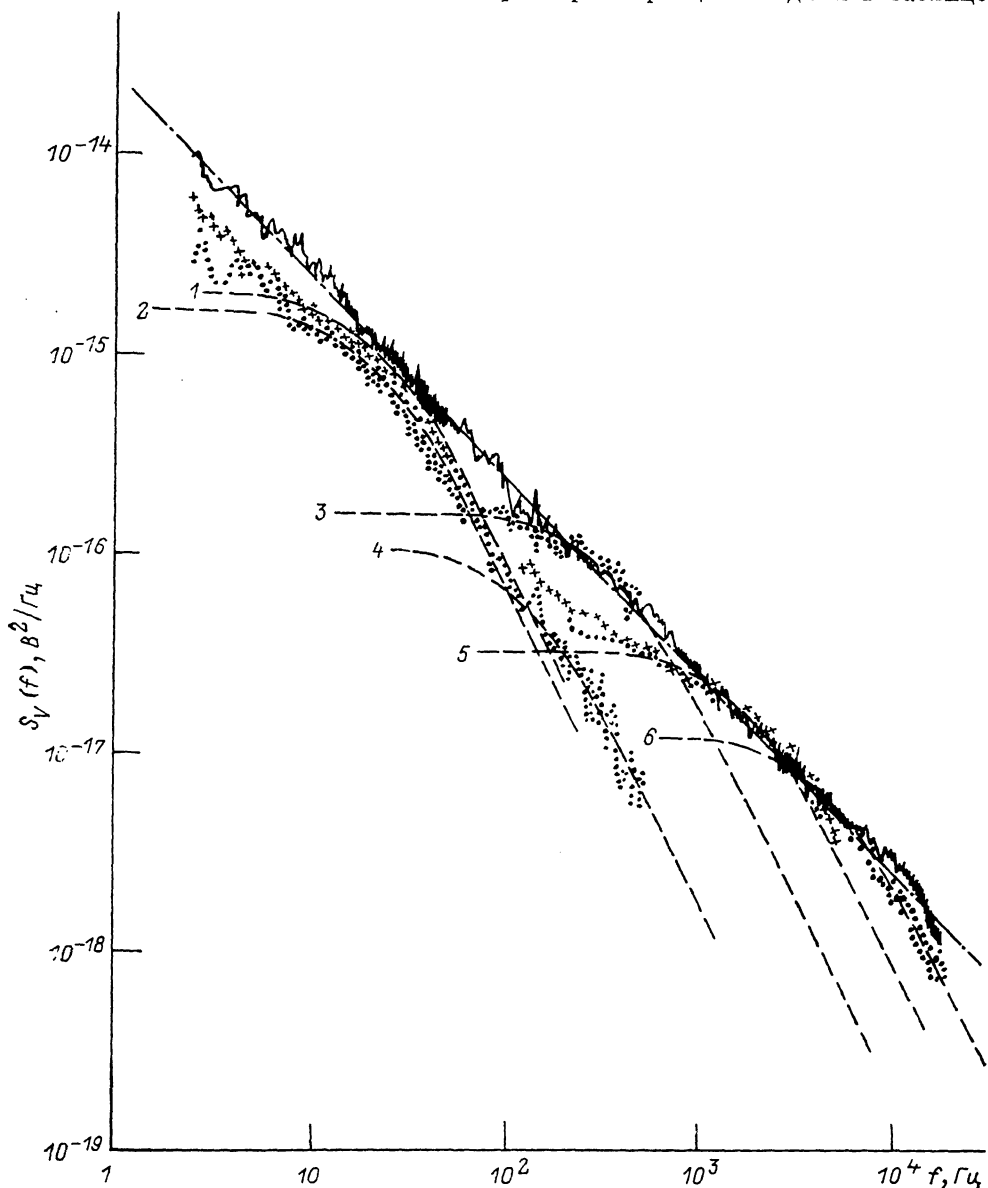


Рис. 2. Типичные результаты измерений спектра избыточного шума при напряжении 95 мВ.

Штрихпунктир — $1/f$ закон; штриховые линии — лоренцевские составляющие, параметры которых приведены в таблице.

Разложение проведено в целях наглядности. Из рис. 2 очевидно, что оно не является единственным. Разложение показывает, однако, что в реальный $1/f$ шум вносят вклад процессы, различающиеся не только по времени релаксации, но и по мощности.

Выявление отдельных взрывных компонент на осциллограммах и в спектре было возможно не всегда. В течение значительных промежутков времени (от не-

Параметры лоренцианов

N	$A \cdot 10^{13}, B^2$	τ, c	N	$A \cdot 10^{13}, B^2$	τ, c
1	2.9	$6.9 \cdot 10^{-3}$	4	0.9	$1.2 \cdot 10^{-3}$
2	2.2	$7.6 \cdot 10^{-3}$	5	3.8	$8.8 \cdot 10^{-5}$
3	3.4	$4.9 \cdot 10^{-4}$	6	3.6	$3.4 \cdot 10^{-5}$

скольких минут до 2—3 ч) отдельные компоненты сливались, приводя к обычным осциллограммам, характерным для $1/f$ шума, и $1/f$ спектру (сплошная линия на рис. 2). Можно предполагать, что это обусловлено наложением на описанные выше взрывные компоненты других, аналогичных компонент.

Временами в избыточном шуме проявлялся добавочный ряд лоренцианов в несколько раз большей интенсивности, чем показано на рис. 1. В совокупности эти компоненты могли бы образовать $1/f$ спектр повышенной интенсивности, но это явление было более редким, хуже воспроизводилось и здесь не рассматривается.

Следует отметить, что наблюдаемый избыточный шум даже во время относительной стабильности при неизменном характере спектра имел несколько повышенную дисперсию дисперсии. Типичная гистограмма распределения дисперсии шума приведена на рис. 1 в сравнении с данными для «контрольного» шума со стабильным $1/f^{1.10}$ спектром, наблюдаемым на участках этой же пластины со сплошными границами зерен. Коэффициент передачи тракта при регистрации «контрольного» шума был уменьшен до уровня, обеспечивающего равенство средних квадратов сигналов от обоих образцов. Для выбранных условий ($f_1=1$ кГц, $f_2=10$ кГц, $\tau_0=13$ мс) параметр F для контрольного образца принимал значения $6.5-7.5 \cdot 10^{-3}$, что близко к расчетной величине $6.5 \cdot 10^{-3}$ [15]. Для описываемого в данной работе шума значения параметра F составляли $9.9 \cdot 10^{-3}-1.4 \cdot 10^{-2}$. Эти относительно небольшие превышения расчетного значения не являются неожиданными для шума с перемежающимися компонентами и свидетельствуют о том, что включение и выключение некоторых менее мощных и не влияющих существенно на измеряемый спектр компонент происходило практически в течение всего времени наблюдения.

При изменении осциллограмм шума дисперсия изменялась скачком, на гистограммах появлялся второй «горб», а спектры, разумеется, не воспроизводились при повторных измерениях. Как указано выше, такие результаты отбрасывались.

Обсуждение

Хорошо известно, что неоднородные металлические и полупроводниковые образцы обладают повышенным $1/f$ шумом и это свойство может быть основой шумовых методов контроля качества материалов. Очевидно влияние неравномерного распределения линий тока и появления дополнительных $1/f$ шумов при прохождении тока через области обеднения [5, 16]. Однако, как показывают наши результаты, возможен и качественно иной механизм формирования $1/f$ шума повышенной интенсивности — из телеграфных сигналов значительной амплитуды по типу взрывных шумов. Пока не ясно, чем обусловлены эти «гигантские» телеграфные сигналы — модуляцией проводимости «слабых мест» потенциальных барьеров кулоновским потенциалом ловушек (или $g-r$ центров), как это предполагается в существующих моделях взрывных шумов [17, 18], либо они связаны с синхронной работой многих локализованных электронных состояний, объединенных друг с другом в некоторые «доменные структуры», либо с процессами включения—выключения отдельных каналов протекания тока в разупорядоченных областях полупроводника. Полученные результаты допускают и не совсем тривиальное объяснение, а именно, что $1/f$ шум не есть суперпозиция независимых лоренцианов, а является собственным свойством ансамбля взаимодействующих систем (в нашем случае, возможно, локализованных электронных состояний на дислокациях). При разрушении взаимодействия происходит распадение общей корреляции, приводящей к $1/f$ спектру,

на элементарные корреляции, характерные для релаксационных лоренцевских спектров. Взаимодействие может не быть эффективным при малом количестве систем, как в опытах [11, 12], или оно может нарушаться при недостаточной пограничной связности, разрываемой ионными перегруппировками, происходящими при тепловом движении, как это предположительно имеет место в наших экспериментах.

Список литературы

- [1] *Du Pre F. K.* // Phys. Rev. 1950. Vol. 78. N 5. P. 615.
- [2] *Van der Ziel A.* // Physica. 1950. Vol. 16. N 4. P. 359—372.
- [3] *Dutta P., Dimon P., Horn P. M.* // Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. N 9. P. 646—649.
- [4] *Pellegrini B., Neri B., Saletti R.* // Alta Freq. 1986. Vol. 55. N 4. P. 245—253.
- [5] *Hooge F. N.* // Physica. 1972. Vol. 60. N 1. P. 130—144.
- [6] *Handel P. H.* // Phys. Rev. 1980. Vol. A22. N 2. P. 745—757.
- [7] *Кузовлев Ю. Е., Бочков Г. Н.* // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 20. С. 1260—1263.
- [8] *Kiss L. B., Török M. I., Ambrosy A.* // Sol. St. Commun. 1985. Vol. 54. N 3. P. 297—299.
- [9] *Коган Ш. М.* // УФН. 1985. Т. 145. № 2. С. 285—328.
- [10] *Weissman M. B.* // Rev. Mod. Phys. 1988. Vol. 60. N 2. P. 537—571.
- [11] *Ralls K. S., Skocpol W. J., Jackel L. D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. N 3. P. 228—231.
- [12] *Rogers C. T., Buhrman R. A.* // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 53. N 13. P. 1272—1275.
- [13] *Knott K. F.* // Sol. St. Electron. 1978. Vol. 21. N 8. P. 1039—1043.
- [14] *Бакин И. С., Кодаляшвили М. З., Сальков Е. А., Хижняк Б. И.* // ФТП. 1988. Т. 22. Вып. 12. С. 2182—2186.
- [15] *Stoitsiek M., Wolf D.* // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. N 1. P. 362—364.
- [16] *Chen T. M., Djeu T. P., Moore R. D.* // 23^d Ann. Proc. Rel. Phys. New York, 1985. P. 87—92.
- [17] *Hsu S. T., Whittier R. J., Mead C. A.* // Sol. St. Electron. 1970. Vol. 13. N 7. P. 1055—1071.
- [18] *Chen T. M., Cottle J. C.* // Sol. St. Electron. 1986. Vol. 29. N 9. P. 865—872.

Институт полупроводников
АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
25 июля 1989 г.
В окончательной редакции
24 апреля 1990 г.