

**ПРОБЛЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ФОРМЫ ДЛЯ
ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ СПЕКТРА НЧ-ШУМА**

© 2016 г. С.Е. РЕЗЧИКОВ, В.А. СЕРГЕЕВ

Ульяновский государственный технический университет

Низкочастотный (НЧ) шум (фликкер-шум, $1/f$ -шум, избыточный шум) присутствует во всех полупроводниковых приборах (ППП).

Применение шумовых измерений позволяет обнаруживать дефектность материала с чувствительностью, недоступной для других методов [1]. Поэтому, параметры НЧ-шума можно использовать в качестве информативных при оценке надёжности ППП [2]. Кроме того, уровень НЧ-шума (1 Гц – 10^4 Гц) – крайне важная характеристика СВЧ- и оптических приборов. Это связано с тем, что НЧ-шум преобразуется с повышением частоты в фазовый шум, что ограничивает характеристики генераторов, смесителей, и других электронных систем [3].

Особенность НЧ-шума заключается в том, что зависимость его спектральной плотности мощности (СПМ) от частоты имеет вид:

$$G_{НЧ}(f) = \frac{A}{f^\gamma}, \quad (1)$$

где A – некоторая константа, γ – показатель формы спектра, важнейший информативный параметр НЧ-шума [4]; на практике показатель формы спектра γ рассчитывается через значения СПМ НЧ-шума на двух (или более) частотах.

Однако, получаемые в ходе экспериментов спектры НЧ-шума не всегда можно удовлетворительно описать математической моделью (1). Например, в [5] приведены спектральные зависимости НЧ-шума в исследованном полупроводниковом материале показанные на рис. 1.

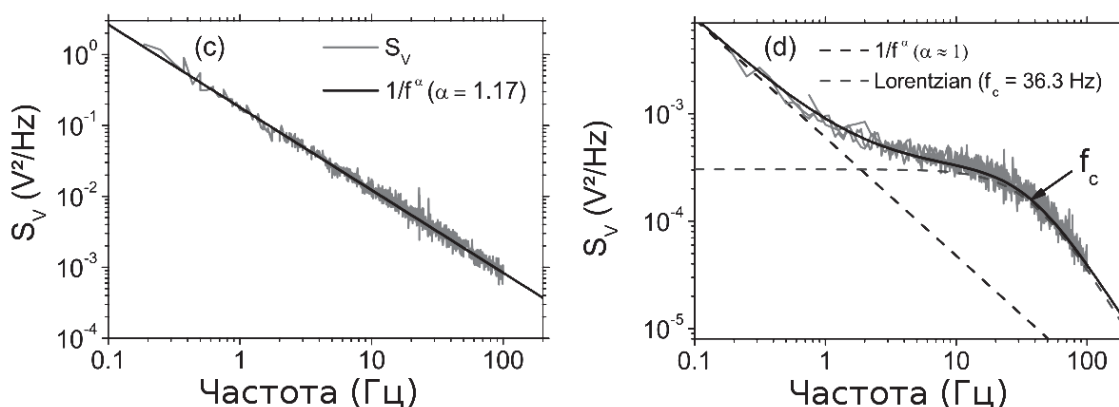


Рис. 1. Зависимость СПМ НЧ-шума в полупроводниковом материале от частоты [5].

Спектр в левой части рис. 1 хорошо описывается выражением (1). Спектр, изображённый в правой части, требует предварительного разложения на составляющую, которую можно описать «лоренцианом» [5], и составляющую, имеющую частотную за-

висимость вида $1/f^\gamma$. При этом, одно из наиболее распространенных математических объяснений вида $1/f$ -спектра шума – суперпозиция лоренцианов [1]. Таким образом, регрессия всей спектральной диаграммы к зависимости $1/f^\gamma$ не позволяет увидеть мелких деталей спектральной зависимости, например, одиночных лоренцианов (рис. 2).

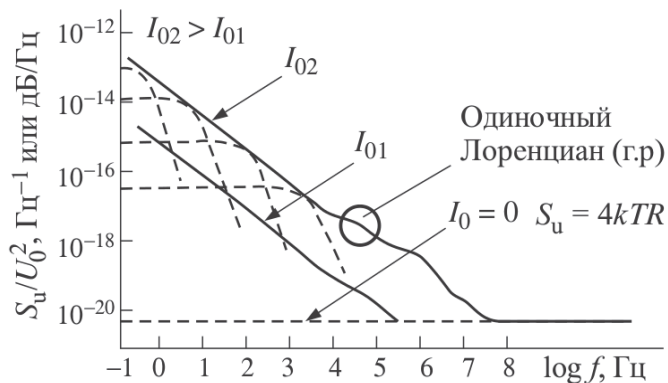


Рис. 2. Спектр НЧ-шума как суперпозиция лоренцианов [1].

В качестве более сложной математической модели можно предложить описание зависимости СПМ от частоты на n -ом промежутке как пропорциональной выражению

$$1/f^{\gamma_n}, \quad (2)$$

где γ_n – значение показателя формы спектра на n -ом частотном промежутке.

Описать весь спектр зависимостью типа (1), заменив в ней γ на γ_n , не удастся, поскольку в этом случае в точке перехода к новому значению γ образуется разрыв. По этой же причине нельзя в выражении (1) заменить постоянный параметр γ на частотно зависимый $\gamma(f)$.

Как известно, на практике, исследователь имеет дело со смесью НЧ- и белого шумов, частотная зависимость СПМ которой описывается выражением [4]:

$$G_{шс}(f) = \frac{A}{f^\gamma} + G_0, \quad (3)$$

где G_0 – уровень белого шума.

Если описывать спектр, имеющий частотную зависимость (3), как пропорциональный (2), то значение $\gamma(f)$ должно непрерывно изменяться с частотой вместе с изменением доли белого шума в шумовой смеси. Если же предварительно вычесть уровень белого шума, то оставшийся НЧ-шум будет описываться выражением (1) с постоянной γ . Проблемы, возникающие при интерпретации спектра НЧ-шума с γ , отличающейся для различных участков оси частот, как шумовой смеси, рассмотрены в [6].

Ещё один важный вопрос, связанный с определением значения γ для небольших участков спектра – оценка погрешности измерений. Очевидно, что для обнаружения различия значений γ на разных участках спектра требуется, чтобы разность этих значений превышала погрешность измерений [7]. Однако, исследователи почти никогда не приводят оценок погрешности измеренных значений параметров НЧ-шума. Так, в работе [8] исследуются флуктуации в плёнках платины и пермаллоя, и говорится, что "для пермаллоя $\gamma = 1,22$, а для платины – $1,01$ в диапазоне частот от $0,001$ до $0,01$ Гц" [8].

Погрешность оценки γ определяется главным образом погрешностью находж-

дения исходных значений СПМ. Оценки погрешности нахождения значения γ по двум точкам рассмотрены в [9-11]. Случайную погрешность оценки показателя формы спектра можно найти по формуле

$$\delta_{\gamma \text{ сл}} = \frac{\sqrt{\delta_{\text{сл}1}^2 + \delta_{\text{сл}2}^2}}{\gamma_0 \cdot \ln(f_2/f_1)} = \frac{\sqrt{1/\Delta f_1 + 1/\Delta f_2}}{\sqrt{T_{\text{изм}}} \cdot \gamma_0 \cdot \ln(f_2/f_1)}, \quad (4)$$

где $\delta_{\text{сл}1}$ и $\delta_{\text{сл}2}$ – относительные случайные погрешности измерения СПМ на частотах f_1 и f_2 соответственно, $T_{\text{изм}}$ – общее время измерения (одновременно на двух частотах), $\Delta f_2, \Delta f_1$ – ширина полосы пропускания (ПП) для этих двух частот измерения.

Вообще, выбор ширины ПП может быть ограничен, главным образом, либо достижением границ ПП другого фильтра, либо достижением начала частотной оси. Рассмотрим случай, когда $(f_2 - f_1)/f_1 \ll 1$. Можно выбрать абсолютные значения ПП на обеих частотах одинаковыми. При этом, относительные ПП будут достаточно узкими и приблизительно равными, а значит, систематической погрешностью при оценке итоговой погрешности определения γ можно будет пренебречь [11]. Если задать ПП фильтров так, чтобы они соприкасались, то получим: $\Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f_\gamma$, где Δf_γ – частотный промежуток на котором оценивается значение γ . Тогда, выражение (4) примет вид:

$$\delta_{\gamma \text{ сл}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\Delta f_\gamma \cdot T_{\text{изм}}} \cdot \gamma_0 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot f_{\text{cp}} + \Delta f_\gamma}{2 \cdot f_{\text{cp}} - \Delta f_\gamma}\right)}, \quad (5)$$

где $f_{\text{cp}} = f_1 + \Delta f_\gamma/2$ – средняя частота интервала Δf_γ .

На рис. 3 построены графики зависимостей времени измерения, требуемого для получения 10%-ной среднеквадратической погрешности от средней частоты измерения. Зависимости построены для $\Delta f_\gamma = 100$ Гц.

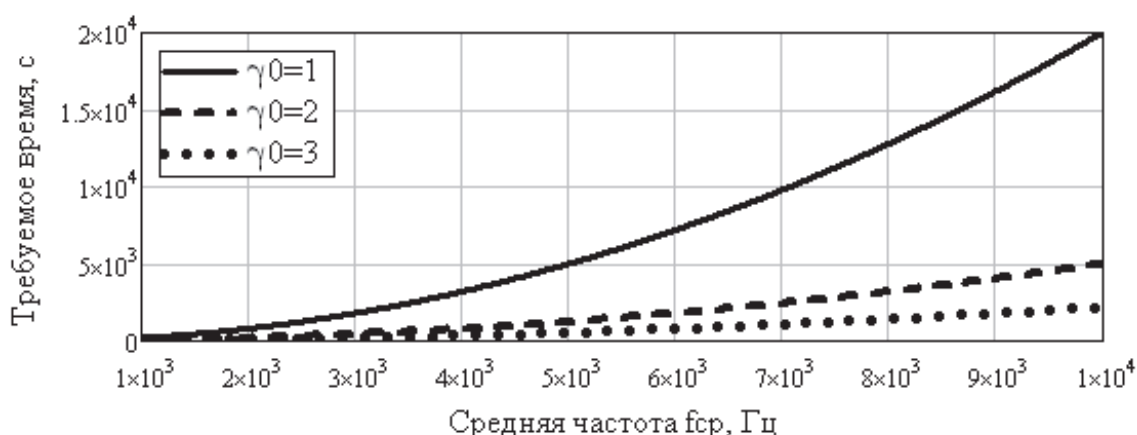


Рис. 3. Зависимость требуемого времени измерения от средней частоты.

При $f_{\text{cp}} = 1$ кГц, $\gamma_0 = 1$ и $\Delta f_\gamma = 100$, требуемое время для достижения погрешности 10% составит 200 с. Это позволит обнаруживать различия показателя γ на различных участках спектра, если они значительно больше 10%. При этом полагаем, что погрешностью, с которой нам известно общее (среднее) значение γ_0 , можно пре-

небрежь. Если же требуется с заданной достоверностью обнаружить различие γ в 10%, то необходимо иметь на порядок меньшую относительную погрешность измерения γ . Для получения погрешности в 1% требуемое время очевидно из (4) в 100 раз больше – 20000 с.

Для значений γ , приведённых в [8], упрощённо можно оценить погрешность так. Принять относительные ПП на обеих частотах равными 1; предположить, что показатель формы спектра действительно равен (для пермаллоя) 1,22, тогда из (4), при $T=226800$ с, получим: $\delta_{\gamma_{сл}} \approx 2,48\%$, и можно было бы записать: $\gamma_{нрм} = 1,22 \pm 0,03$.

Необходимость длительных измерений является недостатком методов диагностики, основанных на исследовании зависимости $\gamma(f)$. В то же время, если принять во внимание, что способ диагностики, предложенный в [2], предполагает проведение процесса искусственного старения в течение «не менее 50 часов» [2], то нужно признать, что длительные шумовые измерения не всегда будут сильно влиять на общее время диагностики.

Кроме того, шумовые измерения необходимы также в научных исследованиях, где требуемое время не так важно, как в условиях производства. Например, в [8] указывается, что запись шума велась 63 часа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левинштейн М.Е. Шум $1/f$ в полупроводниках и полупроводниковых приборах // Международная зимняя школа по физике полупроводников: Научная программа и тезисы докладов. 27 февраля – 1 марта 2004 г. – С.-Петербург–Зеленогорск, 2004. – с. 78-84.
2. Левинштейн М.Е., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М. Способ отбраковки мощных светодиодов на основе InGaN/GaN. Патент RU 2523105 от 22 мая 2014 года. Опубликовано 20.07.2014 Бюл. № 20.
3. Levinshtein M., et al. Tunneling effects and low frequency noise of GaN/GaN HFETs // Advanced experimental methods for noise research in nanoscale electronic devices. Boston: Kluwer Academic Publishers – 2004. – p. 161-168.
4. Резчиков С.Е. Обзор методов измерения показателя спектра НЧ-шума // Радиоэлектронная техника. – 2015. – №2. – с. 88-93.
5. Lonsky M., et al. Electronic transport in thermoelectric $\text{Yb}_2\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ skutterudite thin films studied by resistance noise spectroscopy // J. Appl. Phys. – 2016. – Vol. 120. – p. 142101, 1-8.
6. Резчиков С.Е. Влияние непостоянного показателя формы спектра низкочастотного шума на погрешность измерения // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. X Всеросс. конф. молодых ученых (8–10 сентября 2015 г.). – Саратов, 2015. – с. 130-131.
7. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Измерение непостоянного показателя формы спектра НЧ-шума // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. XI Всеросс. конф. молодых ученых (6–8 сентября 2016 г.). – Саратов, 2016. – с. 158-159.
8. Шутьгинов А.А. Фликкер-шумовая спектроскопия флуктуаций проводимости плёнок платины и пермаллоя // Вестн. Южно-Ур. ун-та. Сер. Матем. Мех. Физ.. 2009. № 11. – с. 105–107.
9. Sergeev V.A., Dulov O.A. The systematic errors of the measurement of the parameters of low-frequency noise with a $1/f^{\alpha}$ spectrum // Measurement Techniques. – 2008. – Vol. 51. – p. 1122-1127.
10. Резчиков С.Е., Сергеев В.А. Оценка погрешности определения показателя степени в спектре НЧ-шума // Радиоэлектронная техника. – 2015. – №1. – с. 94-98.
11. Сергеев В.А., Резчиков С.Е. Методическая погрешность измерений показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума // Измерительная техника. – 2015. – №10. – с. 55-59.