

стью импульса 0.1 пс.

Обсуждаются новые направления исследований в области физики взаимодействия интенсивных потоков вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения с веществом. Перспективы таких исследований связывают с прогрессом в ускорительной технике и созданием лазеров на свободных электронах, способных генерировать потоки фотонов в рентгеновской области спектра высокой интенсивности.

Шум $1/f$ в полупроводниках и полупроводниковых приборах

М. Е. Левинштейн

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Значение любой измеряемой величины флуктуирует («шумит») либо в силу физической природы этой величины, либо в силу неизбежных погрешностей измерения.

В механических системах амплитуда изучаемых шумов лежит в пределах от 10^{-8} см (физиологи уверяют, что такова амплитуда колебаний мембраны внутреннего уха, соответствующая порогу слышимости) до $\sim 10^{11}$ см (флуктуации диаметра солнца, размер протуберанцев). Частота колебаний лежит в пределах от 10^{-4} до $\sim 10^7$ Гц.

В «электрических» системах относительная амплитуда случайных колебаний тока (напряжения) $\delta I/I$ колеблется в пределах от 10^{-11} (атомные стандарты частоты) до 1 («динамический хаос»). Обычно изучаемый частотный диапазон лежит в пределах от 10^{-4} до $\sim 10^{11}$ Гц.

Одной из самых важных характеристик шума является *спектральная плотность шума*. Если, например, измеряются флуктуации напряжения на образце δV , спектральная плотность флуктуаций напряжения $S_v(f)$ (измеряется в $V^2/\text{Гц}$) показывает, какая шумовая мощность сосредоточена в полосе 1 Гц на данной частоте f .

Рис. 1 показывает частотную зависимость спектральной плотности шума для двух предельных случаев: музыкального звука («шум» сосредоточен на частоте звука и нескольких гармониках) и «белого» шума — S_v не зависит от частоты в очень широких пределах.

В сотнях объектов самого различного происхождения и природы спектральная плотность шума в области низких частот (обычно от $10^{-4} < f <$

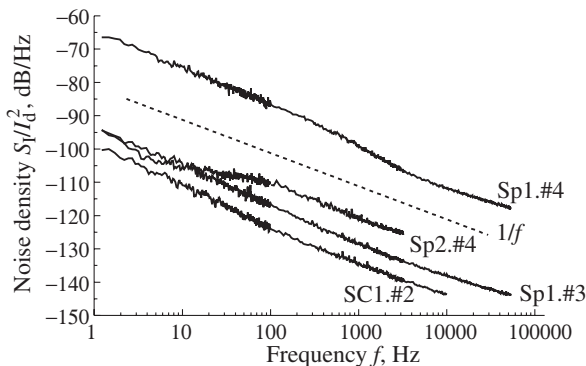


Рис. 1. Пример частотной зависимости спектральной плотности шума типа $1/f$. (Шум в GaN/AlGaIn HFETs, выращенных на сапфировых и карбид-кремниевых подложках.) Пунктиром показана зависимость $1/f$.

$10^4 - 10^6$ Гц) имеет вид $1/f$: $S_v \propto 1/f$ (Рис. 1).

Далеко не полный список таких объектов включает, например,

- полупроводниковые сопротивления всех типов: n - и p -типов, вырожденные и не вырожденные, собственные и примесные, кристаллические, аморфные, поликристаллические, и т.д.;
- «сопротивления» на основе любых металлов и сплавов;
- частотные, фазовые и амплитудные шумы всех полупроводниковых и практически всех других электронных генераторов, включая атомные стандарты частоты, диоды Ганна, ЛПД, все типы полевых и биполярных транзисторов, лазеры, светодиоды, и т.д.;
- намагниченность всех типов ферро- и антиферромагнетиков;
- потенциалы биологических клеток;
- концентрация инсулина в крови при нестабильном диабете (Рис. 2);
- количество автомашин на автостраде в единицу времени (трафик);
- малоамплитудные осцилляции земной коры;
- прозрачность атмосферы;
- уровень паводкового подъема воды в реке Нил (по данным за ~ 2800 лет);
- музыка (в особенности, классическая), и т.д., и т.д., и т.д., и т.д., и т.д.

Явление такой общности привлекает к себе повышенное внимание со стороны патологов, любителей решать «мировые проблемы» и просто сумасшедших. Поэтому «концентрация» патологических теорий, подходов, гипотез в этой области, хотя и уменьшается со временем, все же достаточна велика и по сей час.

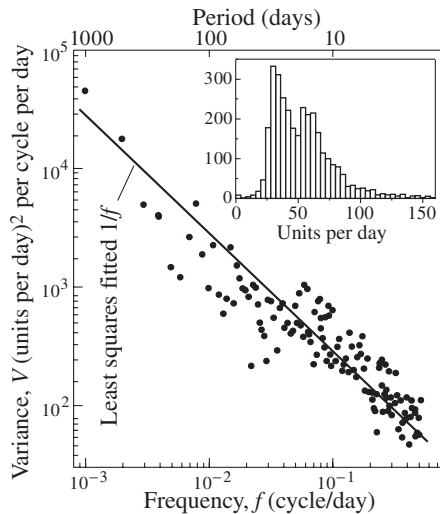


Рис. 2. На вставке показана гистограмма распределения количества инсулина, вводимого ежедневно пациенту, страдающему нестабильным диабетом. (Время наблюдения — 8 лет, всего 3072 доз). На графике показано разложение этой случайной функции в ряд Фурье. Сплошная линия — зависимость $1/f$.

Правда состоит в том, что мы не знаем природы шума $1/f$ в подавляющем большинстве объектов, где он наблюдается. Однако, в тех немногих случаях, когда природа этого шума установлена, например, в ферромагнетиках, многих металлических и полупроводниковых объектах и приборах, этот тип шума возникает вследствие суперпозиции (суммирования) шума от отдельных «флуктуаторов» природа которых, как правило, ясна.

Интегрирование спектральной плотности шума в полосе частот, где преобладает $1/f$ шум, дает мощность, сосредоточенную в этом типе шума. Оценки показывают, что эта мощность лежит в пределах от 10^{-14} (для наиболее стабильных объектов, например, атомных стандартов частоты) до 10^{-5} (для очень «шумных» объектов) от мощности, потребляемой от источника. Несмотря на кажущуюся ничтожность эффекта, шум $1/f$ изучается вот уже почти 80 лет, и число исследователей, вовлеченных в соответствующие работы, монотонно возрастает.

С точки зрения тематики настоящей школы шум $1/f$ наиболее интересен тем, что он очень часто характеризует уровень разупорядоченности полупроводника или металла. При этом шумовые измерения дают возможность обнаруживать дефектность материала с такой чувствительностью, которая оказы-

вается недоступной ни для электрических, ни для оптических методов. В Si, например, уровень шума $1/f$ может изменяться на 5–6 порядков при практически неизменных значениях подвижности и концентрации.

Физическая природа $1/f$ шума имеет много общего с такими явлениями как электромиграция, внутреннее трение, деградация.

Уровень шума $1/f$ определяет предельную обнаружительную способность практически всех типов оптоэлектронных приборов и предельную чувствительность широкополосных налоговых схем. Высокая чувствительность иногда дает возможность по уровню шума $1/f$ на любой стадии изготовления приборов судить о их будущей надежности и долговечности.

Однако, с практической точки зрения, шум $1/f$ важен, прежде всего, потому, что именно он определяет в подавляющем большинстве случаев уровень фазовых и частотных шумов всех СВЧ и оптических генераторов. Низкочастотные флуктуации активного элемента генератора (полевого или биполярного транзистора, ЛПД, диода Шоттки, диода Ганна, и т.д.) преобразуются в шум вблизи несущей частоты генератора (convert up). Чем выше уровень шума $1/f$, тем более широкую полосу частот приходится отводить на один связной канал.

Как упоминалось выше, в тех случаях, когда природа шума $1/f$ установлена, этот тип шума возникает вследствие суперпозиции (суммирования) шума от отдельных «флуктуаторов».

В случае, если случайный процесс характеризуется одной постоянной времени, τ , (элементарный флуктуатор), спектральная плотность шума S имеет вид так называемого «Лоренциана»: $S \propto \frac{\tau}{1+(\omega\tau)^2} = \frac{\tau}{1+(2\pi f\tau)^2}$. На частотах, существенно меньших, чем $f_0 = 1/\tau$, S не зависит от частоты. При $f_0 \gg 1/\tau$, $S \sim 1/f^2$.

Наиболее простой пример такого рода шума в полупроводниках — генерационно-рекомбинационный (ГР) шум от локального уровня в запрещенной зоне полупроводника (Рис. 3а). Средняя концентрация свободных носителей (электронов), «поставляемая» в зону проводимости уровнем, определяется концентрацией уровня, положением уровня Ферми и температурой. Однако, в действительности, эта концентрация флуктуирует, и как следствие, концентрация носителей в зоне может быть и меньше, чем средняя (проводимость образца понижена), и больше, чем средняя (проводимость повышена). Постоянная времени обмена носителями между уровнем и зоной, τ , определяется концентрацией носителей в зоне проводимости, сечением захвата уровня и температурой. Исследуя температурную зависимость шума (Рис. 3б), можно определить энергию активации уровня, сечение захвата и концентрацию центров (шумовая спектроскопия).

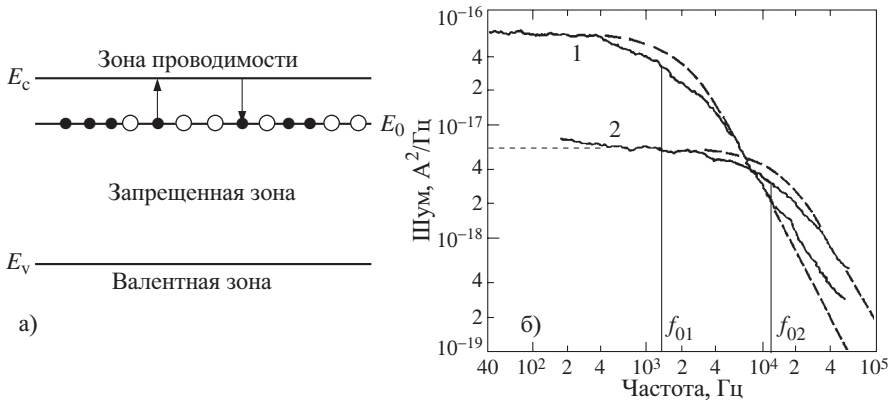


Рис. 3. а) Концентрация свободных носителей (электронов), поставляемая в зону проводимости уровнем в запрещенной зоне, флуктуирует с постоянной времени τ . Как следствие, флуктуирует сопротивление образца.
 б) Спектры токовых шумов образца n-GaAs при температуре $T = 241$ К (кривая 1) и 293 К (кривая 2). Штриховые линии соответствуют классическим Лоренцианам. Постоянная времени $\tau = 1/2\pi f_0$ падает с ростом температуры.

Суперпозиция тесно расположенных Лоренцианов (распределенных с надлежащим статистическим весом) может обусловить шум типа $1/f$ (Рис. 4). Действительно, интегрирование в широкой полосе значений τ с функцией распределения $p(\tau)$:

$$S(f) = \int_0^{\infty} \frac{\tau}{1 + (\omega\tau)^2} p(\tau) d\tau$$

при $p(\tau) \sim 1/\tau$ дает $1/f$ шум во всем диапазоне частот.

Разумеется, для любой реальной системы нет нужды в интегрировании от нуля до бесконечности. Достаточно интегрировать от частот много ниже, чем нижний предел наблюдаемого шума $1/f$ (обычно этот предел составляет 10^{-1} – 10 Гц, в редких случаях $\sim 10^{-3}$ Гц, в уникальных — 10^{-3} Гц), до частот, превышающих верхнюю границу $1/f$ шума (Рис. 4). Обычно эта граница составляет 10^3 – 10^6 Гц. Однако, найти в реальном объекте источник флуктуаций, обеспечивающий достаточно «плотное» распределение флуктуаторов со значениями τ , меняющимися в пределах 5–10 порядков, как правило, задача нетривиальная. Собственно, в этом и состоит, как правило, реальная, а не параноидальная загадка $1/f$ шума.

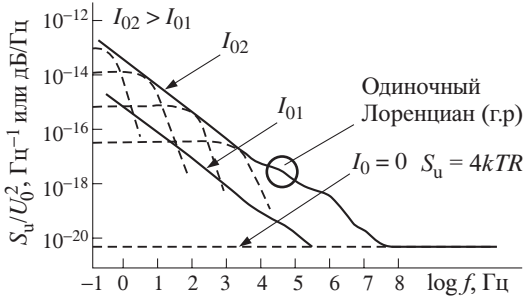


Рис. 4. Суперпозиция тесно расположенных Лоренцианов, распределенных с надлежащим статистическим весом, может обусловить шум типа $1/f$.

Некоторая «подсказка» содержится в виде функции распределения $p(\tau)$. Пусть, например, речь идет о флуктуациях проводимости в полупроводнике или металле. Понятно, что источником шума могут служить флуктуации подвижности и/или флуктуации числа носителей. Предположим, что для того, чтобы носитель на время «выбыл» из проводимости: захватился на центр в объеме, на поверхности, в прилегающем слое окисла, и т.д., он должен преодолеть энергетический барьер с энергией $\varepsilon \gg kT$. Носитель атакует этот барьер с частотой $f_0 = 1/\tau_0$. Характерная постоянная времени преодоления такого барьера $\tau = \tau_0 \exp(\varepsilon/kT)$. Характерная вероятность $p(\tau) \sim \exp(-\varepsilon/kT)$. Как видно, в этом случае $p(\tau) \sim 1/\tau$. Если в материале имеется «набор» барьеров с близко расположенными энергиями ε , возникнет шум типа $1/f$ (модель P. Dutta and P. M. Horn, *Rev. Modern Phys.* **53**, 497–516, (1981)). То., подсказка состоит в том, чтобы искать экспоненциально широкое распределение возможных постоянных времени τ . Для флуктуаций проводимости со спектром $1/f$ в полупроводниках и металлах известны три физических механизма $1/f$ шума.

Во многих МОП приборах, включая и самый важный прибор современной электроники — MOSFET, проводимость флуктуирует за счет туннелирования и последующего захвата носителей на ловушки, расположенные в окисле. В этом случае экспоненциально широкое распределение постоянных времени τ возникает за счет экспоненциального уменьшения вероятности туннелирования с увеличением расстояния от границы раздела полупроводник-окисел до ловушки (модель A. L. Mc Whorter, in: *Semiconductor Surface Physics* (ed. by R. N. Kingston, Univ. Pennsylvania Press, Philadelphia) p. 207 (1957)).

В металлах и сильно легированных полупроводниках довольно часто шум $1/f$ возникает за счет флуктуаций подвижности, обусловленных изменением за счет температурных флуктуаций пространственного и/или зарядового со-

стояния дефектов. Экспоненциально широкое распределение постоянных времени τ обуславливается наличием спектра дефектов с различными энергиями активации (модель Ш. М. Коган и К.Э. Нагаев, ФТТ, **24**, 3381–3388 (1982)).

В ряде полупроводников (GaAs, Si при пониженных температурах, возможно, GaN) шум $1/f$ обусловлен флуктуациями заселенности уровней, образующих хвост плотности состояний вблизи границ зоны проводимости и валентной зоны. Экспоненциально широкое распределение постоянных времени τ обусловлено многофононным механизмом захвата носителей на уровни в хвостах плотности состояний (Н. В. Дьяконова и М. Е. Левинштейн, ФТП, **23**, 283–291, (1989)).

Даже в таких относительно простых объектах как электронные приборы найти источник шума $1/f$, определить его природу и проследить связь этого явления с другими эффектами, как правило, бывает очень непросто.

В природных и, в особенности, биологических объектах, природа шума $1/f$, как правило, совершенно непостижима. Где «спрятаны» наборы постоянных времени τ , позволяющие реке Нил «помнить», каков был уровень паводка 2800 лет назад? Что человеческий организм может помнить о том, какая доза инсулина была введена 8 лет назад (рис. 2)? Почему спектральное разложение «Бранденбургского Концерта» Баха дает спектр $1/f$?

Между тем, сейчас каждая третья статья о шуме $1/f$ посвящена исследованиям этого феномена в биологии и медицине. Даже не понимая природы явления, из эмпирического анализа шума $1/f$ оказывается возможным установить интересные и полезные закономерности.